

*IL DIBATTITO SUL VUOTO NEL XVII SECOLO: DALL' HORROR
VACUI ALLA TEORIA DELLA PRESSIONE*

Salvatore Ricciardo

L'esistenza del vuoto in natura fu una delle questioni più dibattute dai filosofi della natura che vissero durante il secolo della cosiddetta 'rivoluzione scientifica', soprattutto dopo la diffusione del famoso esperimento barometrico eseguito da Viviani su indicazione di Torricelli nel giugno del 1644. Infatti, sebbene la natura dello spazio e la possibilità del vuoto fossero argomenti ampiamente affrontati dai filosofi dei secoli precedenti, fu nel Seicento che si fece strada l'idea che la risposta a tali questioni potesse giungere non da astratte speculazioni, ma da esperimenti ben definiti. Tuttavia, tale speranza si dimostrò ben presto un'illusione, tanto che nel secolo successivo la questione del vuoto perse progressivamente la propria rilevanza filosofica, fino ad essere inserita da Kant tra le antinomie della ragione, questioni per definizione indecidibili. Se nel corso del Seicento la domanda circa l'effettiva esistenza del vuoto non trovò una risposta definitiva, le indagini sperimentali condussero tuttavia all'abbandono di uno degli assiomi fondamentali della fisica aristotelica, ossia il principio per cui il vuoto in natura è impossibile poiché esso ripugna alla natura stessa delle cose.

Uno dei protagonisti indiscussi del dibattito seicentesco sul vuoto fu Blaise Pascal. Come vedremo, Pascal si occupò dei fenomeni del vuoto dal 1647 al 1654, anno in cui terminò il trattato che aveva annunciato fin dalla sua prima opera sull'argomento, intitolata *Nuovi esperimenti sul vuoto (Expériences nouvelles touchant le vide)*, e che noi conosciamo nella forma pubblicata postuma nel 1663 da suo cognato Florin Périer, i due *Trattati sull'equilibrio dei liquidi e sulla pesantezza della massa dell'aria*, opera in cui Pascal riconduceva agli stessi principî i fenomeni idrostatici e quelli pneumatici, enunciando inoltre il principio che porta il suo nome e che ancora campeggia nei manuali di fisica: la forza che una massa fluida esercita in un punto si trasmette uniformemente, ossia con la stessa intensità, in ogni altro punto e in tutte le direzioni. Per Pascal tale principio rappresentò una tappa fondamentale della dimostrazione degli effetti del peso dell'aria e della pressione atmosferica, le vere cause di tutta una serie di fenomeni – primo fra tutti la resistenza incontrata nel separare due superfici lisce, per esempio due lastre di marmo, in contatto tra loro – che fino a un decennio prima la quasi totalità dei filosofi attribuiva all'orrore della natura per il vuoto, uno degli assiomi fondamentali della fisica

aristotelica, un'«erronea opinione», come la definiva Pascal, la cui affermazione era stata il prodotto di tre ulteriori errori:

Il primo è che si è creduto in quasi ogni epoca che l'aria fosse leggera, perché era stato affermato dagli antichi autori [...]. Il secondo è che si è pensato che gli elementi non pesano affatto in sé stessi [...]. Il terzo errore è di tutt'altra natura: esso non è più sull'argomento dell'aria, ma su quello degli effetti stessi che essi [gli antichi] attribuivano all'orrore del vuoto, su cui avevano pensieri del tutto erronei»¹.

Il primo degli errori identificati da Pascal risaliva alla concezione aristotelica della pesantezza e della leggerezza come qualità o determinazioni positive dei corpi; il secondo era il prodotto di una convinzione che si era fatta strada a partire da Erone, mentre il terzo era riconducibile a una serie di opinioni consolidate che attribuivano all'orrore della natura per il vuoto una potenza infinita. In questa introduzione ci occuperemo degli sviluppi del dibattito sul vuoto in quell'arco di tempo che da Galileo arriva ai primi anni Settanta del XVII secolo. In questo periodo, che copre poco più di sessant'anni, gli errori di cui parlava Pascal nella conclusione dei *Traité*s erano stati via via corretti dall'opera di Galileo, Isaac Beeckman, Torricelli, e infine dallo stesso Pascal. I successori, da Boyle a Huygens, avevano sviluppato i risultati delle ricerche precedenti sul peso e la pressione dell'aria, perfezionando gli esperimenti precedenti ed escogitandone di nuovi con l'ausilio della macchina pneumatica. All'inizio del secolo non tutti, però, riconobbero gli effetti della pressione dell'aria e, più in generale, essi faticarono a distinguere il peso dell'aria dalla pressione, due concetti che anche negli anni successivi rimasero spesso confusi, almeno fino a Pascal. La fisica aristotelica esercitava ancora una certa influenza, e non solo all'interno delle università. Vi erano principî, come quello per cui gli elementi non hanno alcun peso nei rispettivi luoghi naturali, che furono condivisi sia dagli autori della scolastica che dagli spiriti più illuminati del Seicento, primo fra tutti Galileo. Per iniziare, dunque, ci soffermeremo sulle origini della dottrina dell'*horror vacui*, il vero bersaglio di molti degli innovatori del secolo della cosiddetta "rivoluzione scientifica", e sulle concezioni riguardanti l'aria e gli altri elementi che secondo Aristotele costituivano i componenti fondamentali di tutti i corpi che si trovavano all'interno della regione terrestre. Accanto ad esse, accenneremo ad alcune questioni riguardanti il moto e il luogo degli elementi, concetti da cui Aristotele e i commentatori successivi cercarono di dedurre l'impossibilità logica del vuoto. Infatti, sebbene le argomentazioni di natura logica contro il vuoto furono sostanzialmente estranee al dibattito seicentesco sul vuoto, esse entrarono tuttavia a far parte dell'armamentario teorico dei fautori dell'*horror vacui*.

I. IL VUOTO NELL'ANTICHITÀ: UNA BREVE INTRODUZIONE

Secondo quanto riferisce Aristotele, i primi a sostenere l'esistenza del vuoto furono i pitagorici tra la fine del VI e gli inizi del IV secolo a.C.² Sembra però che i pitagorici non distinguessero il vuoto assoluto da ciò che è pieno d'aria. Una volta posta tale distinzione, la prima reazione fu quella di negare che in natura si desse un vero vuoto, come fece uno dei discepoli di Parmenide, Melisso di Samo (V secolo a.C.). Scopo di Melisso era dimostrare che l'essere è effettivamente immobile. Per farlo egli prese le mosse da una semplice constatazione: affinché si dia il movimento è necessario che esista il vuoto, ma il vuoto è per definizione un non-ente, per cui l'essere è immobile³.

I filosofi cosiddetti "pluralisti" ebbero come obiettivo l'affermazione della realtà del divenire e della possibilità di conoscerlo razionalmente. All'essere uno e immobile essi sostituirono l'essere molteplice, composto da una pluralità di enti, ognuno dei quali conserva le caratteristiche dell'essere degli eleati: Empedocle (V secolo a.C.) introdusse i quattro elementi o radici primordiali (aria o etere, acqua terra e fuoco) e i due principi dell'Amicizia e Inimicizia, Anassagora (V secolo a.C.) i semi o omeomerie. Essi avevano in tal modo eliminato il non essere – generazione e corruzione non sono che il prodotto delle successive aggregazioni di tali componenti ultimi ingenerate e incorruttibili –, salvando però i fenomeni naturali e la possibilità di averne una conoscenza vera. Tuttavia, Empedocle e Anassagora conservarono l'idea di Melisso che il vuoto fosse identico al non essere e, in quanto nulla, non esistente. Essi negarono l'esistenza del vuoto ricorrendo a semplici esperienze: Anassagora aveva portato l'esempio della clessidra, uno strumento che poco ha a che vedere con il dispositivo per misurare il tempo, utilizzato invece per decantare i liquidi e trasferirli da un recipiente all'altro. Esso era formato da un vaso con dei piccoli fori alla base e una stretta imboccatura. Una volta immersa nel liquido e tappata l'imboccatura superiore, la clessidra poteva essere sollevata senza che il suo contenuto fuoriuscisse. Viceversa, se l'imboccatura veniva tappata prima di immergere il vaso, il liquido non entrava nei fori. Per Anassagora queste semplici esperienze dimostravano che dove sembrava esservi il vuoto, in realtà vi era dell'aria, che appariva così avere una consistenza materiale⁴.

I primi ad affermare l'esistenza del vuoto come spazio assolutamente privo di corpi furono gli antichi atomisti Leucippo e Democrito, suo discepolo, entrambi vissuti nel V secolo a.C. Come Empedocle e Anassagora, anche Leucippo e Democrito si confrontarono con i problemi dell'essere, del divenire e del non essere sollevati da Parmenide e dai suoi discepoli. Essi posero due principi alla base della realtà: gli atomi e il vuoto. I primi, per natura indivisibili, sono in numero infinito e si differenziano solo per la forma, l'ordine e la posizione; essi sono privi di qualità sensibili. Il vuoto è invece lo spazio che separa gli atomi e ne rende possibile il movimento, che è continuo, eterno e

del tutto casuale. In virtù del loro movimento gli atomi si aggregano e si separano, dando così origine alla varietà dei fenomeni naturali e a un numero infinito di mondi⁵.

Com'è noto, le dottrine degli antichi atomisti ci sono note in gran parte grazie ad Aristotele, il filosofo che tra gli antichi fu indubbiamente il critico principale dell'esistenza del vuoto. Nel quarto libro della *Fisica*, egli distinse i due significati del termine vuoto (*kenon*) nella dottrina atomistica: il vuoto separato (successivamente indicato con l'espressione *vacuum separatum*), ossia lo spazio o intervallo esterno ai corpi (*diastema*), e il vuoto disseminato, identificato con una quantità di piccoli intervalli che dividono gli atomi (variamente denominato *vacuum intermixtum*, *vacuum imbibitum*, *vacuum disseminatum*). In realtà, secondo Aristotele il secondo tipo di vuoto non era essenzialmente diverso dal primo: in entrambi i casi, l'assunzione di uno spazio assolutamente privo di materia portava a inevitabili contraddizioni logiche ed era inutile per rendere conto di quei fenomeni, come la rarefazione e la condensazione, che secondo gli atomisti dimostravano l'esistenza del vuoto. Nel caso del vuoto separato, Aristotele prendeva le mosse dal concetto di luogo e dalla teoria del moto locale. Secondo la definizione dello Stagirita, il luogo è «il limite del corpo contenente (in quanto contiguo al corpo contenuto)». Egli aggiunse inoltre che per «contenuto» si doveva intendere «un corpo che possa essere mosso mediante spostamento». Il luogo presuppone dunque il movimento del corpo che lo occupa; esso rimane invece immobile, tanto che Aristotele concludeva la trattazione del luogo definendolo come «il primo immobile limite del contenente»⁶. Per illustrare il concetto, egli ricorreva alla metafora del vaso, nonostante le difficoltà che essa presentava (soprattutto in relazione all'immobilità del luogo). Quando diciamo che l'acqua è in un vaso, il luogo dell'acqua non è lo spazio tridimensionale che si estende tra le pareti interne del vaso, ma coincide con la superficie interna del vaso. Parlare di un luogo vuoto costituisce quindi un'evidente contraddizione, dal momento che il luogo presuppone sempre la presenza di un corpo. Concepire il luogo come uno spazio esteso privo di corpi, ma capace di accoglierli, porta inoltre a concludere che in uno stesso luogo possano esservi simultaneamente due corpi, il che costituisce una violazione del principio dell'impenetrabilità⁷.

Gli atomisti sostenevano che il vuoto era necessario affinché potesse darsi movimento; in realtà, spiegava Aristotele, è proprio ammettendo il vuoto separato che il moto locale risulta impossibile. Anzitutto, perché nel vuoto non vi sono luoghi naturali verso cui tendere: in esso i corpi rimarrebbero sempre in quiete. Tuttavia, proseguiva Aristotele, se prescindiamo dall'assenza di determinazioni positive – un alto e un basso verso cui tendere – e concediamo che i corpi si muovano nel vuoto, essi lo farebbero con velocità infinite. Tale conclusione è la diretta conseguenza dell'assunto per cui la velocità di un corpo è direttamente proporzionale al peso e inversamente proporzionale alla resistenza opposta dal mezzo (la misura di tale resistenza è data dalla densità del mezzo). Dal momento che nel vuoto per definizione non vi è alcun mezzo capace di opporre resistenza,

il moto di un corpo dotato di peso sarebbe istantaneo. Si prenda l'esempio di una pietra scagliata in aria: essa continua a muoversi fintantoché viene spinta dal mezzo, ossia dall'aria stessa. Più precisamente, la mano che scaglia la pietra non solo imprime il movimento a quest'ultima, ma sposta anche una parte dell'aria circostante, che così spinge in avanti la pietra spostando simultaneamente la parte di aria successiva, che a sua volta spinge la pietra e sposta la parte ancora successiva e così via, fino a quando la forza motrice dell'aria diventa talmente piccola da non essere più in grado di vincere la resistenza opposta sia dall'aria che dalla pietra stessa: è a questo punto che la pietra cade verso il centro della Terra in virtù del proprio moto naturale. Nel vuoto, però, manca il mezzo che imprime la spinta e che oppone resistenza, per cui la velocità aumenterebbe indefinitamente e corpi con peso diverso cadrebbero con velocità uguali⁸. Tale interpretazione si fondava sull'antiperistasi (*antiperistasis*), termine che indica il moto che avviene per spinte e sostituzioni successive di un corpo con l'altro, una sorta di propulsione circolare che ricordava il movimento della ruota. Sebbene il termine fosse stato coniato da Aristotele, la prima formulazione di tale dottrina si deve a Platone, che nel *Timeo* l'aveva invocata per spiegare una serie di fenomeni che sembravano implicare una sorta di attrazione a distanza: la respirazione, della suzione e del moto dei proiettili. Nell'Antichità essa fu adottata dagli stoici, come Cleante e Seneca, sia da platonici, come Plutarco, accomunati dal rifiuto del vuoto e dell'attrazione a distanza⁹.

Oltre che al movimento, secondo gli antichi atomisti il vuoto era necessario affinché in natura i corpi potessero contrarsi ed espandersi, come accade per esempio al vino, che travasato dalle botti agli otri si comprime concentrandosi nei vuoti presenti all'interno di questi ultimi. Ipotizzando l'esistenza di vuoti tra gli atomi era inoltre possibile spiegare perché due vasi, l'uno pieno di cenere e l'altro vuoto, potessero contenere la medesima quantità d'acqua. Sebbene il tipo di vuoto a cui gli atomisti facevano riferimento fosse in qualche modo diverso dal vuoto che separa i corpi macroscopici, tuttavia per Aristotele era soggetto alle medesime difficoltà. Di più, il vuoto interstiziale non era affatto necessario per spiegare i processi di rarefazione e condensazione, che lo Stagirita interpretava come alterazioni corrispondenti alla categoria della qualità, e non della quantità. In tal senso raro e denso erano qualità contrarie, esattamente come il caldo e il freddo, presenti in potenza nell'unica materia indifferenziata. In altre parole, un corpo da rarefatto diventava denso esattamente come l'acqua si trasforma in aria, ossia senza una variazione nella quantità di materia, ma in virtù del passaggio dalla potenza all'atto. Aumento e diminuzione di volume implicavano dunque un cambiamento qualitativo, che avveniva indipendentemente dalla presenza o meno di vuoti interstiziali¹⁰.

Nei secoli successivi, i fautori dell'*horror vacui* non si limitarono a riprendere le argomentazioni aristoteliche contro il vuoto. Essi fecero affidamento soprattutto su quanto Aristotele aveva insegnato a proposito del peso degli elementi e dei loro moti naturali e violenti. Com'è noto, lo Stagirita aveva diviso il mondo in due regioni

nettamente distinte, quella terrestre, che si estendeva dal centro della Terra alla superficie concava della sfera lunare, e quella celeste, che comprendeva la Luna, i pianeti e le stelle fisse, corpi incorruttibili composti dal quinto degli elementi, l'etere, e dotati unicamente di moto circolare uniforme. Nel cosmo aristotelico il vuoto non esisteva né nella regione celeste, dove gli spazi apparentemente vuoti erano in realtà occupati da sfere di etere, invisibili e trasparenti, che ruotando portavano con sé i pianeti e le stelle, né nella regione terrestre. Quest'ultima era divisa in quattro sfere concentriche, ognuna delle quali costituiva il luogo naturale di uno dei quattro elementi: la sfera più esterna, che seguiva la superficie concava della prima sfera celeste, la sfera lunare, era il luogo naturale del fuoco; quella successiva lo era dell'aria, mentre al di sotto vi erano la sfera dell'acqua e quella della Terra, che nella cosmologia aristotelica rappresentava il centro geometrico dell'universo.

A differenza della regione celeste, quella terrestre era il regno dei mutamenti, che Aristotele distingueva secondo le quattro categorie: sostanza, qualità, quantità, luogo. La traslazione o moto locale indicava il movimento in senso proprio, a sua volta distinto in moto naturale e violento. Ogni elemento era infatti dotato di un proprio moto che lo portava verso il rispettivo luogo naturale. Quando uno degli elementi si trovava al di fuori del proprio luogo naturale, la direzione del suo moto era determinata dalla pesantezza o leggerezza dell'elemento, che Aristotele concepiva come qualità o determinazione positive dei corpi. In altre parole, un corpo leggero non era tale perché meno pesante, ma perché possedeva la qualità della leggerezza, e lo stesso avveniva per i corpi pesanti. Inoltre, leggerezza e pesantezza potevano essere assolute o relative: il fuoco, che occupava la sfera più esterna, era leggero in assoluto, così come la terra era pesante in assoluto, occupando la sfera più interna. Ciò significava che al di fuori dei rispettivi luoghi naturali, il primo si sarebbe mosso invariabilmente verso l'alto, la seconda verso il basso. Aria e acqua potevano dirsi rispettivamente leggera e pesante in assoluto, ma soltanto l'una rispetto all'altra. In altri casi, esse erano leggere o pesanti a seconda dell'elemento considerato: entrambe leggere rispetto alla terra, ma pesanti rispetto al fuoco. I corpi naturali, in quanto formati dalla mescolanza dei quattro elementi, potevano dirsi leggeri o pesanti a seconda della predominanza di questo o di quell'elemento e del luogo in cui si trovavano. Per questa ragione, un talento di legno nell'aria peserà di più di una mina di piombo, mentre nell'acqua sarà più leggero: il primo galleggerà, la seconda andrà a fondo. In conclusione, secondo Aristotele anche l'aria aveva un peso che, come tutti gli altri elementi – eccetto il fuoco, leggero in assoluto –, essa conservava anche nel proprio luogo naturale¹¹. Egli cercò anche di stabilire il peso dell'aria. Muovendo dall'assunto secondo cui la velocità di un corpo è proporzionale al suo peso, egli calcolò che il peso dell'aria rispetto all'acqua era esprimibile con una proporzione identica a quella tra le rispettive velocità, pari a 1:10¹².

A questo punto per Aristotele era naturale domandarsi cosa sarebbe accaduto se uno degli elementi fosse venuto a mancare. Qualora fosse mancato l'elemento sottostante, quello superiore, che da leggero sarebbe diventato pesante, doveva cadere in virtù del proprio peso nella regione immediatamente inferiore, come sarebbe accaduto all'aria nel caso fosse stata tolta l'acqua. Allo stesso modo, anche l'acqua sarebbe caduta nella regione della terra. Il discorso era diverso per il fuoco, che essendo leggero in assoluto, sarebbe rimasto sempre nella propria regione. Cosa accadeva, invece, togliendo l'elemento sovrastante? L'aria non sarebbe mai andata nella regione del fuoco, così come l'acqua non si sarebbe mai sollevata verso quella dell'aria. O meglio, ciò poteva accadere, ma non naturalmente, bensì soltanto «per costrizione», e a condizione che le superfici degli elementi fossero perfettamente contigue, in modo da «combaciare in un'unica superficie», circostanza che secondo Aristotele non poteva verificarsi nel caso della terra. Aristotele sviluppò questo ragionamento nel *De coelo*, mostrando come ciò accadesse effettivamente in quell'esperienza che definiva «dei vasi riscaldati»¹³.

Nel *De coelo* non troviamo alcuna descrizione di tale fenomeno, del quale si occupò invece uno dei meccanici più famosi dell'Antichità, Filone di Bisanzio (metà del III secolo a.C.), la cui opera sulle macchine pneumatiche (*Pneumatica*) fu tradotta dall'arabo in latino nel XIII secolo. Egli descrisse due distinte esperienze. La prima consisteva nel prendere una sfera di piombo cava e un vaso pieno d'acqua, collegandoli con un tubo ricurvo in modo che quest'ultimo fosse immerso nell'acqua. Riscaldando la sfera, per esempio esponendola ai raggi solari, l'acqua nel vaso cominciava a ribollire: secondo Filone ciò accadeva perché l'aria riscaldata circolava dalla sfera al vaso. Quando invece la sfera veniva tolta dal sole e posta in un luogo ombreggiato, l'acqua nel vaso saliva attraverso il tubo fino a raggiungere la sfera. La seconda esperienza era condotta con un vaso di vetro provvisto di una piccola bocca, una candela e una bacinella piena d'acqua. Una volta accesa la candela, il vaso era capovolto su di essa in modo che i bordi venissero a contatto con la superficie dell'acqua. A quel punto l'acqua cominciava a sollevarsi, agendo così in palese contrasto alla propria tendenza naturale, esattamente come accadeva nel primo esperimento. Filone aveva spiegato il fenomeno sostenendo che la fiamma della candela consumava l'aria contenuta nel vaso. L'acqua doveva sollevarsi per occupare il luogo corrispondente alla quantità di aria distrutta dalla fiamma, per evitare che si formasse il vuoto. Filone applicava la medesima spiegazione al funzionamento dei sifoni e alla clessidra: l'acqua agiva contrariamente alla propria tendenza naturale sia in virtù della contiguità con l'aria, sia perché il vuoto è impossibile, tanto per natura quanto per violenza¹⁴.

L'opera di Filone era stata la fonte di un altro dei grandi meccanici dell'Antichità, Erone di Alessandria (I-II secolo d.C.), che nell'introduzione ai due libri della *Pneumatica* si era occupato della struttura dell'aria, del vuoto e del funzionamento dei sifoni e della clessidra. Seguendo la distinzione tra vuoto separato e vuoto disseminato risalente ad

Aristotele, Erone riconobbe che in natura il vuoto era possibile, ma solo al livello microscopico, ossia nei pori che ricoprono le superfici dei corpi. Per quanto riguarda il vuoto separato, egli non negò che potesse esistere, ma precisò che era ottenibile solo in maniera violenta, per esempio come accadeva nel fenomeno della clessidra. Per illustrare la struttura dell'aria, Erone si servì dell'analogia con i granelli di sabbia. Come i granelli non aderiscono perfettamente gli uni agli altri, ma sono separati da piccoli intervalli, così l'aria è formata da particelle separate da interstizi vuoti. Quando essa è sottoposta a compressione violenta, tali particelle si avvicinano le une alle altre, ma quando tale compressione cessa, l'aria riacquista il volume originario. Se il vuoto disseminato era presente in natura, il vuoto separato era invece ottenibile solo artificialmente, ossia applicando una forza capace di dividere le particelle d'aria e creare così un vuoto maggiore di quello che si trova naturalmente tra esse. Secondo Erone una semplice esperienza dimostrava la possibilità di produrre artificialmente il vuoto separato, nonché gli effetti di questo. Prendendo un vaso di vetro con una piccola apertura, e aspirando l'aria in esso contenuta, il vaso rimarrà appeso alle labbra. Tale fenomeno si spiega con il fatto che il vuoto formatosi all'interno del vaso, essendo più grande del vuoto interstiziale che esiste naturalmente tra le particelle d'aria, attrae a sé ogni corpo esterno (in questo caso le labbra) affinché quel maggior vuoto possa essere riempito. Lo stesso accade nelle ventose, nelle coppette di suzione impiegate dai medici e nei sifoni e in tutti quei fenomeni in cui l'aria subisce l'applicazione di una forza che ne disgrega la struttura¹⁵.

Le opere dei meccanici dell'Antichità, pur essendo conosciute durante il Medioevo, come dimostra la traduzione dell'opera di Filone, non suscitarono grande interesse se non a partire dal XV secolo. Fu solo allora che i filosofi naturali riscoprirono autori come Ctesibio, Erone, Vitruvio e opere come le *Questioni meccaniche* pseudo-aristoteliche. Diverso fu il destino delle opere di Aristotele, che dalla metà del XIII secolo trasformarono la vita intellettuale dell'Occidente latino. Fu precisamente allora che la dottrina dell'*horror vacui* cominciò a diffondersi, dominando incontrastata fino alla metà del Quattrocento, quando tutti quei fenomeni tradizionalmente associati ad essa cominciarono ad essere interpretati in un contesto filosofico nuovo.

II. LA DOTTRINA DELL'*HORROR VACUI* E IL VUOTO NEL MEDIOEVO

Espressioni come *horror vacui*, *fuga vacui* e *natura abhorret vacuum* si diffusero nelle opere dei filosofi della natura del XIII secolo, sebbene il loro significato fosse già implicito negli scritti di Filone e Alessandro di Afrodisia (II-III sec. d.C.). Questi autori riprendeva il passaggio del *De coelo* discusso sopra, e lo applicavano alla spiegazione di una serie di

fenomeni in cui gli elementi seguivano direzioni contrarie ai rispettivi moti naturali, dall'ascensione dell'acqua nelle cannule alla sospensione dei liquidi nella clessidra, come fece secoli dopo Averroè (1125-1198) nel commento al *De coelo*. Nelle opere di questi autori era implicita l'idea che il comportamento anomalo dell'acqua fosse legato alla necessità di evitare la formazione di spazi vuoti: la natura, piuttosto che ammettere il vuoto, deviava dal suo corso, violando così i principî fondamentali della fisica aristotelica¹⁶. Era tuttavia necessario attribuire una causa a tali fenomeni, visto che il vuoto, in quanto non-ente, non poteva essere causa di nulla. Se la causa efficiente poteva essere ricavata dal passaggio del *De coelo* – l'acqua sale perché condivide la superficie con l'aria, e ne è attratta –, essa tuttavia non costituiva propriamente una spiegazione, che in termini aristotelici richiede invece l'identificazione della causa finale di un fenomeno¹⁷.

Il primo a offrire una soluzione fu uno dei membri più illustri della Facoltà delle Arti di Parigi, Roger Bacon (1214/20 ca.-1292 ca.). La sua teoria si fondava sull'assunto che tutti i corpi naturali fossero sottoposti all'influenza di due nature distinte, la «natura particolare» (*natura specialis* o *particularis*) e la «natura universale» (*natura universalis*). La prima presiedeva al moto di un corpo verso il proprio luogo naturale e ne determina il comportamento nel normale corso degli eventi. La natura universale, che Bacon concepiva come un agente universale di origine celeste, influenzava i corpi naturali in quanto parti di un tutto. Il fine di tale agente era la conservazione della continuità materiale dell'universo quando essa appare minacciata dalla possibile formazione vuoto. Esso aveva il potere di sospendere i principî fisici che regolavano il corso ordinario dei fenomeni per evitare la formazione del vuoto, quando se fosse presentata la possibilità. Bacon illustrò la teoria della doppia natura nel corso delle sue lezioni all'università di Parigi proprio ricorrendo all'esempio della clessidra. Secondo Bacon la sospensione dell'acqua non era dovuta propriamente alla necessità di evitare il vuoto. Il vuoto, in quanto privazione o negazione, non poteva essere la causa del fatto che l'acqua rimane immobile nell'aria. Essa andava invece ricercata in un principio positivo, che egli identificava con la continuità naturale. Per preservare tale continuità, la natura universale agiva in contrasto alle leggi aristoteliche, provocando la caduta di corpi leggeri e il sollevamento di quelli pesanti. Altri autori medievali condivisero l'idea di Bacon che il vuoto non potesse essere causa di nulla e tantomeno dell'attrazione che portava i corpi ad allontanarsi dai rispettivi luoghi naturali. In quanto forza positiva, l'attrazione doveva avere una causa positiva, una forza celeste la cui natura era quella di unire ogni cosa.¹⁸

Nel corso del XIV secolo la teoria della doppia natura fu applicata a una quantità di fenomeni che, come il caso della clessidra, erano considerati altrettante prove dell'impossibilità del vuoto. Mentre Aristotele aveva cercato di confutare l'esistenza del vuoto con la forza della logica, gli autori della Scolastica medievale mostrarono un maggior interesse per argomentazioni di natura empirica, tratte cioè da fenomeni come la

resistenza incontrata nei tentativi di separare due superfici a contatto diretto; l'impossibilità di azionare mantici o soffietti quando la loro imboccatura fosse stata chiusa; l'ascensione dei liquidi nelle cannule e nei sifoni. Non è ovviamente possibile soffermarci sulla pletora di esperienze invocate a sostegno dell'impossibilità del vuoto¹⁹. Tuttavia, una di queste merita di essere approfondita, se non altro perché ritornerà costantemente nelle opere degli autori del XVII secolo. Si tratta dell'adesione di due superfici perfettamente lisce, la cui separazione incontrava una resistenza formidabile. Nel tardo Medioevo tale fenomeno fu considerato come la prova più convincente dell'impossibilità del vuoto. Esso era già noto nel I secolo a.C. come dimostra un passaggio del *De rerum natura* Lucrezio, in cui il poeta latino lo cita come una prova dell'esistenza del vuoto:

Se due corpi estesi venuti a scontrarsi rimbalzano di colpo lontani, di necessità avviene che l'aria occupi tutto il vuoto che si fa tra i due corpi. Ma per quanto l'aria d'intorno confluisca con rapide onde, non potrà in un istante riempirsi tutto lo spazio: è necessario ch'essa occupi il luogo che via via è più vicino, finché da ultimo possieda tutto lo spazio²⁰.

Se i corpi estesi di cui parla Lucrezio fossero stati separati in modo da essere mantenuti paralleli, per giungere dai bordi al centro delle superfici l'aria avrebbe impiegato necessariamente del tempo, per quanto piccolo. Ciò dimostrava che il vuoto era possibile, seppur per un brevissimo istante. La fonte da cui gli autori medievali attinsero per la descrizione di tale esperienza non poteva essere il poema lucreziano, dal momento che questo rimase sconosciuto all'Occidente latino fino al XV secolo, quando, nel 1418, il manoscritto fu scoperto da Poggio Bracciolini in un convento dell'Europa centrale e pubblicato nel 1473 a Brescia. Il fenomeno attrasse comunque l'attenzione di diversi filosofi della natura, tra cui Roger Bacon, il quale elaborò una sorta di teoria *ad hoc*, con cui si proponeva di spiegare la separazione senza tuttavia dover ammettere il vuoto, oppure presupporre che l'aria per riempire lo spazio tra le due superfici ed evitare il vuoto dovesse muoversi con velocità infinita. Bacon argomentò che il vuoto si sarebbe formato solo nel caso in cui le due superfici fossero rimaste parallele durante la separazione. Il punto era proprio questo: separare simultaneamente due dischi di marmo perfettamente lisci mantenendoli in posizione parallela secondo Bacon era del tutto impossibile, dato che la natura non ammette la formazione di spazi vuoti. Quando tale separazione si verificava, ciò accadeva a causa della leggera inclinazione di una delle due superfici. Tale circostanza permetteva l'ingresso dell'aria che riempiva gradualmente lo spazio tra i due dischi. In tal modo, Bacon riusciva a difendere la plenitudine del mondo senza dover supporre il moto istantaneo dell'aria. Nonostante la fortuna che ebbe la teoria di Bacon presso i contemporanei, essa aveva il difetto di non essere empiricamente controllabile, dato che assumeva che, se vi era separazione, una certa inclinazione dovesse sempre

verificarsi, anche se non era possibile percepirla attraverso i sensi. Viceversa, se non vi era separazione, ciò significava che una delle due superfici non poteva essere piegata: in tal caso, la natura universale era all'opera per impedire la formazione del vuoto. Non tutti i filosofi medievali trovarono soddisfacente la spiegazione di Bacon. Per esempio, Walter Burley (1275 ca.-1345 ca.) osservò che anche ipotizzando che la separazione avvenisse per gradi, la possibilità del vuoto non era eliminata, poiché l'aria avrebbe impiegato comunque un certo tempo per passare dall'estremità al centro di ogni singola porzione delle superfici, a meno di attribuirle una velocità infinita. Se la teoria di Bacon poteva eliminare le due assurdità del vuoto e del moto istantaneo in relazione all'intera superficie, esse si ripresentavano per ogni singola parte di essa. Burley risolse il problema postulando semplicemente che due corpi non potessero mai aderire perfettamente. Secondo Burley vi era sempre una certa quantità d'aria tra due superfici, per quanto piccola, dal momento che la velocità con cui esse venivano a contatto era sempre maggiore di quella con cui l'aria che si trovava tra esse poteva essere espulsa. Quando si fossero separate le due superfici, l'aria intrappolata tra esse subiva una rarefazione pressoché istantanea, evitando così la formazione del vuoto. Oltre il limite massimo di tale rarefazione, o quando era inverosimile supporre che tra due corpi vi fosse dell'aria, la natura universale interveniva a preservare la continuità materiale²¹.

Nel panorama della filosofia tardo-medievale il maestro delle arti parigino Nicola d'Autrecourt (1295-1369) fu l'unico a prendere in considerazione la possibilità fisica del vuoto. Seguace delle teorie di Guglielmo di Ockham e fautore di posizioni radicalmente anti-aristoteliche, D'Autrecourt continuò a sostenere l'impossibilità fisica del vuoto separato, eppure si mostrò convinto che il movimento e i fenomeni di rarefazione e condensazione implicassero l'esistenza del vuoto interstiziale²². Tuttavia, è anche vero che numerosi filosofi presero in considerazione la possibilità logica del vuoto, soprattutto in riferimento al moto naturale, domandandosi cosa sarebbe accaduto se un corpo si fosse trovato ad attraversare uno spazio in cui non vi è alcun mezzo resistente. La storia del dibattito medievale sul moto nel vuoto richiederebbe una trattazione a sé stante, cosa che qui non è possibile fare. Tuttavia è importante sottolineare che dalla seconda metà del XIII secolo numerosi filosofi, appartenenti soprattutto alla scuola dei fisici parigini, elaborarono una serie di argomentazioni a sostegno della possibilità logica del movimento nel vuoto. Essi cercarono di dimostrare che, contrariamente a quanto sostenuto da Aristotele, in linea ipotetica un corpo nel vuoto si sarebbe mosso con velocità finita, per quanto grande. Tali sviluppi non condussero però al rovesciamento della filosofia naturale aristotelica. Essi furono stimolati, almeno in parte, dalla condanna emanata il 7 marzo 1277 dal vescovo di Parigi Étienne Tempier contro 219 tesi filosofiche e teologiche che dal suo punto di vista minacciavano l'ortodossia cristiana. Tra le proposizioni condannate, due in particolare riguardavano il concetto di vuoto: l'articolo 34, secondo cui Dio non potrebbe creare altri mondi («La causa prima non può creare una molteplicità

di mondi), e l'articolo 49, per cui «Dio non può muovere i cieli con moto rettilineo. Perché in questo caso si produrrebbe un vuoto»²³. Il primo articolo discendeva direttamente da quanto Aristotele aveva affermato nel *Del cielo* a proposito dell'unicità del mondo e dell'impossibilità che ve ne sia più d'uno; il secondo era evidentemente conseguenza dell'assunto aristotelico secondo cui il moto rettilineo è impossibile nella regione celeste, dove invece tutti i corpi incorruttibili si muovono di moto circolare. La condanna di queste due proposizioni apriva quindi all'esistenza di uno spazio vuoto al di là del nostro mondo, una possibilità che da quel momento i filosofi della scolastica furono pronti ad ammettere. Tuttavia, come ha osservato Edward Grant, uno dei massimi storici della scienza medievale, se Dio poteva creare un vuoto al di là del mondo, Egli avrebbe potuto farlo anche dentro di esso. Filosofi della natura e teologi elaborarono una serie di ipotesi controfattuali (*secundum imaginationem*) apertamente in contrasto con i principi della fisica e della cosmologia aristoteliche. Esse erano volte a esplorare cosa sarebbe accaduto se, per esempio, Dio avesse scelto di distruggere tutta o parte della materia che riempie la regione terrestre. Era questo il caso, per esempio, che aveva portato a sostenere che nel vuoto che, nella sua onnipotenza, Dio avrebbe potuto creare, i corpi si sarebbero mossi con velocità finita verso i rispettivi luoghi naturali. Tuttavia, nel corso del Medioevo nessuno fu disposto a concedere la possibilità reale del vuoto separato²⁴.

Dalla metà del Quattrocento in avanti la scoperta di testi della tradizione classica fino ad allora pressoché sconosciuti o conosciuti soltanto indirettamente ebbe un impatto non indifferente sul dominio della filosofia aristotelica. Abbiamo ricordato la pubblicazione del *De rerum natura*, l'opera che più di ogni altra determinò la rinascita dell'atomismo nei due secoli successivi. Accanto al poema lucreziano altri testi antichi contribuirono alla diffusione di correnti filosofiche alternative all'aristotelismo, dal platonismo allo stoicismo, con il risultato che quelle esperienze che la scolastica aveva considerato prove empiriche della *fuga vacui* finirono per rappresentare argomenti a favore dell'esistenza del vuoto. Nel corso del Cinquecento queste esperienze furono discusse da Bernardino Telesio, Francesco Patrizi e Adrien Turnèbe, autori che, pur mirando principalmente alla confutazione delle interpretazioni scolastiche, sottolinearono come la pretesa impossibilità del vuoto poggiasse sul presupposto che non fosse possibile forzare la natura oltre i propri limiti. Per esempio, Bernardino Telesio aveva sostenuto che adottando adeguati accorgimenti sarebbe stato possibile costruire uno strumento così resistente da poter separare i due lati anche tenendo l'apertura tappata, e ottenere così il vuoto. Anche la sospensione dei liquidi poteva essere forzata o annullata, costruendo una clessidra con fori più ampi. Gli autori rinascimentali tuttavia si limitarono a riportare e discutere esperienze tramandate dalla letteratura precedente, probabilmente senza ripeterle in prima persona²⁵. In questo contesto la diffusione della *Pneumatica* di Erone – tradotta dal greco in latino nel 1575 da Federico Commandino e in italiano dall'ingegnere ferrarese Giovan Battista Aleotti (1549-1636) – stimolò il dibattito sul funzionamento delle pompe

idrauliche e sulla possibilità di ottenere artificialmente il vuoto. Una questione particolarmente discussa riguardava un fenomeno noto ai maestri fontanieri. L'esperienza insegnava che non era possibile sollevare l'acqua oltre una certa altezza, un fatto ordinariamente attribuito a difetti materiali delle pompe, che all'epoca venivano costruite quasi completamente in legno. Durante il Cinquecento vi fu un notevole progresso delle conoscenze e delle abilità tecniche, il che consentì di perfezionare strumenti noti da tempo e ideare macchine sempre più complesse. Le pompe idrauliche attirarono l'attenzione di filosofi naturali, medici, ingegneri, mineralogisti, figure che spesso coincidevano in un'unica persona. Se ne occuparono Georg Bauer, detto Agricola (1494-1555) e l'ingegnere Agostino Ramelli (1531-1590), che nelle loro opere descrissero batterie di pompe in grado di riempire sempre più velocemente cisterne e acquedotti o essere impiegate nelle miniere. Furono così introdotti miglioramenti, per esempio sostituendo le parti in legno con il metallo o perfezionando le valvole esistenti, ma l'impossibilità di sollevare l'acqua oltre un certo limite continuò ad essere attribuita a difetti di costruzione. Una pompa perfetta sarebbe stata capace di sollevare l'acqua a un'altezza pressoché infinita. Filosofi come Girolamo Cardano e Giovambattista della Porta rifiutarono le idee di Erone sulla natura dell'aria e il vuoto. Quest'ultimo, pur rifiutando esplicitamente la dottrina dell'*horror vacui*, attribuiva la causa dei fenomeni del vuoto alla presenza in natura di una tendenza alla «conservazione del proprio essere», che definiva «l'amor continuo, e scambievole nelle cose della natura»²⁶. Tanto Cardano quanto della Porta rifiutavano l'idea che un non-ente come il vuoto potesse agire da causa fisica²⁷. Per quanto riguarda il limite del sollevamento delle acque, il primo a rendersene conto fu il francese Salomon de Caus ne *Les raisons des forces mouvantes*, opera pubblicata a Francoforte nel 1615, il quale affermava che una pompa idraulica smetteva di funzionare oltre i trenta piedi francesi²⁸.

III. IL PESO DELL'ARIA E IL VUOTO PRIMA DI TORRICELLI: DA GALILEO A BERTI

Come abbiamo ricordato precedentemente, nel *De coelo* Aristotele aveva affermato che tutti i corpi hanno un peso nei rispettivi luoghi naturali, con la sola eccezione del fuoco. Nel caso dell'aria, tale verità era confermata dal fatto che «un otre gonfio pesa più d'un otre vuoto»²⁹. Più tardi Erone respinse la teoria aristotelica, invocando la legge di Archimede, così come fecero su basi diversi i commentatori greci, da Simplicio a Temistio. Essi cercarono anche di verificare l'affermazione di Aristotele, controllando se effettivamente un otre o una vescica pieni d'aria pesassero più di una vuota. Alcuni trovarono che i pesi erano uguali, mentre altri affermarono che una vescica gonfia pesava addirittura meno di una vuota. Tutti dunque furono concordi nel ritenere che gli elementi non pesassero nei rispettivi luoghi naturali, una convinzione che accomunò tanto i

sostenitori del peso assoluto dell'aria quanto coloro che le attribuivano una gravità relativa, e che passò inalterata dal Medioevo al Rinascimento. L'unico che sembrò mettere in dubbio questa verità fu, come evidenziò Corneliis de Waard, un allievo di Giordano Nemorario, che sembrò intuire la possibilità che al loro interno i fluidi esercitassero una pressione. Del resto, l'idea che i corpi non pesassero in sé stessi trovava riscontro nel senso comune. Se l'aria avesse avuto un peso, esso doveva essere percepibile. Invece nessuno lo avvertiva, com'era trascurabile anche il peso dell'acqua, che al di fuori del proprio luogo naturale pesava, ma al suo interno non sembrava gravare poi tanto su chi vi era immerso. Secondo gli storici, una simile convinzione riuscì a sopravvivere anche alle soglie del Seicento a causa dell'influenza della legge di Archimede, che stabiliva che le uniche forze ammissibili all'interno dei fluidi erano quelle verticali. Il concetto di pressione e quello di peso rimasero sostanzialmente confusi. Alcuni riconobbero che i liquidi gravavano sul fondo del recipiente in cui erano contenuti, ma non sui corpi al loro interno. Come vedremo a breve, con Galileo il funzionamento delle pompe idrauliche sarà discusso in un contesto del tutto nuovo, quello della scienza della resistenza dei materiali³⁰.

L'unico che all'epoca riconobbe l'esistenza della pressione interna ai liquidi che agisce uniformemente in tutte le direzioni fu Simon Stevin (1548-1620), che con i suoi studi di idrostatica aprì la strada all'abbandono definitivo dell'idea che i corpi non abbiano gravità nel proprio luogo naturale, per quanto egli stesso continuasse a credere che i liquidi non pesano in sé stessi. Egli intuì che un liquido in virtù del suo peso esercita sul fondo e sulle pareti del recipiente; stabilì che la forza che esercita sulla parte del fondo dipende dall'area della base e dall'altezza della colonna del liquido al di sopra della base e dal peso specifico del liquido, non dal suo volume totale, pur non enunciando formalmente il principio generale, stabilito tardi da Pascal. Negli *Elementi di Idrostatica (De Beghinselen des Waterwichts*, 1586), esaminando la causa per cui un uomo immerso in acqua non sembra subire l'effetto del peso del liquido che lo sovrasta, Stevin affermò che l'acqua esercita una pressione uguale in tutte le direzioni sui corpi al suo interno, per cui le parti del corpo non vengono spinte al di fuori del proprio luogo, ma rimangono dove sono, per quanto la parte superiore di acqua che sovrasta il corpo eserciti una pressione leggermente maggiore³¹.

Il primo ad adottare il concetto di pressione uniforme per i fenomeni pneumatici fu l'olandese Isaac Beeckman (1588-1637). Figlio di un mastro birraio, Beeckman nacque a Middelburg, la capitale della Zelanda, una provincia del sud-ovest dei Paesi Bassi. Nei primi anni della sua carriera lavorò nell'impresa di famiglia, occupandosi dell'installazione e riparazione di sistemi idraulici per le birrerie. I contributi che Beeckman diede alla scienza dell'epoca rimasero però confinati nelle pagine del suo diario scientifico, che attestano come egli avesse iniziato a riflettere sul peso dell'aria, la pressione e il vuoto a partire dal 1613. Lo stesso anno rifiutò la teoria dell'*horror vacui*,

affermando che il sollevamento dell'acqua nei sifoni e nelle pompe era dovuto all'azione della pressione che l'aria esercita in virtù del proprio peso. Egli riprendeva inoltre la tesi atomistica del legame necessario tra vuoto e movimento, affermando l'esistenza di un vuoto tra le particelle dei corpi. Esaminando il funzionamento delle pompe, egli si rese conto che la resistenza incontrata nel tirare il pistone era dovuta allo squilibrio tra il peso dell'aria che premeva sull'acqua e il vuoto o la pochissima aria rimasta all'interno del cilindro³². Conclusioni, queste, che Beeckman raggiunse tra il 1614 e il 1616, e che in parte rese pubbliche come corollari alla tesi del 1618 per il dottorato in medicina all'Università di Caen, intitolata *De febre tertiana intermittente*. Il primo di questi corollari attribuiva la causa dell'ascensione dell'acqua in un tubo sigillato alla pressione dell'aria: «l'acqua che viene aspirata da una pompa non è tratta dalla forza del vuoto, ma piuttosto spinta in alto dalla pressione dell'aria»; nel secondo Beeckman sosteneva l'esistenza del vuoto interstiziale³³. Poco tempo dopo la discussione della sua tesi, Beeckman cominciò a riflettere su quali dovessero essere le proprietà fisiche delle particelle che compongono la materia. Egli era infatti un fautore della teoria corpuscolare, sebbene conservasse la distinzione aristotelica dei quattro elementi, ritenendo che a ognuno di essi dovesse corrispondere un certo tipo di particella con determinate proprietà geometrico-meccaniche. Inoltre, riflettendo su un fenomeno che apparentemente contraddiceva la tesi della pressione, concluse che l'aria doveva essere un corpo elastico. Beeckman si domandò perché le pompe continuassero a funzionare anche quando non erano esposte direttamente all'aria. In questo caso, infatti, l'effetto della pressione atmosferica avrebbe dovuto essere eliminato. Immaginando che l'aria fosse un corpo formato da particelle simili ad anelli sovrapposti gli uni sugli altri, egli pensò che dovesse comportarsi come una spugna, come già aveva affermato Erone. In questo modo, gli strati inferiori dell'aria erano continuamente compressi da quelli sovrastanti, per cui l'effetto della pressione rimaneva sostanzialmente inalterata, salvo diminuire man mano che si procedeva con l'aspirazione, operazione che infatti incontrava una resistenza sempre maggiore. Esisteva anche un limite alla possibilità di sollevare l'acqua, che tuttavia Beeckman non quantificava. Dopo il 1620 Beeckman attenuò in qualche modo la propria posizione vacuista, affermando che tra i pori erano diffuse le particelle più piccole di un altro elemento etereo assimilabile al fuoco o alla luce, responsabile, insieme alla pressione dell'aria, dei fenomeni magnetici e della rarefazione. All'interno di questo fluido sottile Beeckman postulava l'esistenza di piccoli vuoti³⁴.

Se le intuizioni di Beeckman si scontravano con il principio per cui l'aria non pesa in sé stessa, nel corso della sua lunga carriera Galileo non si discostò mai da questa idea. Negli scritti giovanili *De motu antiquiora* Galileo si era occupato a lungo del problema del vuoto, soffermandosi in particolare sull'affermazione di Aristotele per cui i corpi nel vuoto sarebbero caduti con velocità infinita. Una conclusione del tutto falsa, perché falsa era la premessa su cui si fondava: nel vuoto il moto dei corpi in caduta libera non sarebbe

stato istantaneo, poiché la velocità non dipendeva al peso assoluto, come sosteneva Aristotele, ma dal peso specifico del grave, che solo nel vuoto manifestava compiutamente il proprio carattere di forza motrice. In un mezzo il peso effettivo di un corpo era dato così dalla differenza tra il suo peso specifico e quello del mezzo, e corpi dello stesso peso specifico, ma di volumi diversi, cadevano con la stessa velocità. Galileo era giunto a tale risultati dopo aver confutato la teoria aristotelica della leggerezza positiva e sostituito il peso e la leggerezza assoluti con il concetto di gravità in specie. Tutti gli elementi avevano quindi un peso, compresa l'aria, e la materia non era qualitativamente differenziata, ma sostanzialmente omogenea, per cui la stessa teoria dei quattro elementi non aveva più alcuna ragion d'essere: ogni corpo è dotato di peso, e un corpo leggero è soltanto un corpo meno pesante. L'unica entità ad essere priva di peso era il vuoto. A tal proposito, Galileo sembrava sostenere l'esistenza del vuoto disseminato, per esempio come condizione della rarefazione e della condensazione, ma negava esplicitamente la possibilità del vuoto separato³⁵.

Nel 1612 Galileo tornò sul problema del vuoto nel *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua, che in quella si muovono*. Quest'opera, che Galileo scrisse su richiesta del Granduca Cosimo II, fu il risultato di una polemica che lo vide impegnato con due filosofi aristotelici nell'estate del 1611, mentre si trovava a villa Le Selve, ospite dell'amico e discepolo Filippo Salviati. Seguendo una tradizione ben consolidata, i peripatetici sostenevano che il ghiaccio fosse acqua condensata, mentre Galileo riteneva che in realtà fosse acqua rarefatta. Per rendersene conto era sufficiente considerare che esso galleggia in quanto è più leggero dell'acqua allo stato liquido. Gli avversari obiettarono che il galleggiamento dei solidi non dipendeva dal peso, ma dalla forma, per cui corpi piatti e larghi si sostengono sulla superficie dell'acqua, mentre quelli affusolati e sferici affondano. Senza entrare nei dettagli del *Discorso*, è sufficiente sottolineare che secondo Galileo il fatto che un solido galleggi o affondi dipendeva dal rapporto tra il suo peso specifico e quello dell'acqua, precisando che il volume della parte immersa è sempre maggiore di quello dell'acqua che viene spostata³⁶. Vi era tuttavia un fenomeno che sembrava contraddire la teoria di Archimede. Gli avversari peripatetici facevano però notare che la spiegazione di Galileo contrastava con un'esperienza molto semplice. Date una palla d'ebano e una tavoletta della stessa materia, la prima affondava, mentre la seconda galleggiava. Dunque, se davvero era la relazione tra i pesi specifici a determinare il comportamento dei solidi immersi in acqua, perché, presi due corpi della stessa materia – dunque di pari peso specifico – l'uno galleggia e l'altro affonda? La difficoltà non era da poco, tanto che Galileo stesso la definiva come «il punto principale della presente quistione»³⁷.

Per risolvere quella che sembrava essere un chiaro contro-esempio alla teoria archimedeica, Galileo cercò di dimostrare che in realtà la tavoletta d'ebano non si trovava al di sopra della superficie dell'acqua. In altre parole, essa non era un galleggiante.

Osservando con attenzione, si poteva infatti notare che le falde d'ebano, così come quelle in oro, non galleggiano, ma sono «notabilmente più basse che la superficie di essa [acqua], la quale, intorno alle medesime falde, resta eminente, e gli fa quasi un argine, dentro le cui profondità restano notando»³⁸. La tavoletta o falda d'ebano si trovava quindi sotto la linea della superficie dell'acqua, e questo perché il suo peso specifico era maggiore di quello dell'acqua. Tuttavia, perché essa non veniva sommersa completamente?

La soluzione di Galileo era tanto ingegnosa quanto elaborata: le lamine di materiali di peso specifico maggiore rispetto a quello dell'acqua galleggiavano perché era necessario considerare l'aria contenuta negli «arginetti», ossia negli spazi che circondano la tavoletta immersa nel liquido, e quella contigua alla superficie della tavoletta stessa. In altre parole, la presenza dell'aria causava una diminuzione del peso della tavoletta³⁹. I peripatetici avrebbero potuto obiettare che bagnando la sommità, la palla affonda perché essa risulta più pesante, in quanto al suo peso bisogna aggiungere quello dell'acqua. In tal modo essa vincerebbe la resistenza opposta dall'acqua, cadendo verso il basso. Galileo replicò non solo che i fluidi, in virtù della loro struttura corpuscolare, non oppongono alcuna resistenza al moto attraverso di essi – essi influenzano soltanto la velocità del moto, ma non lo impediscono in modo assoluto⁴⁰ –, ma che l'acqua non avrebbe potuto assolutamente aggiungere peso, e questo perché, com'era universalmente riconosciuto, gli elementi non esercitano alcun peso in sé stessi: «Il dir poi che l'acqua possa accrescer peso alle cose che in essa sieno collocate, è falsissimo, perché l'acqua nell'acqua non ha gravità veruna»⁴¹. Secondo Galileo, la presenza dell'aria non soltanto causava una diminuzione del peso della tavoletta: l'aria contigua alla superficie della lamina agiva come un sostegno, quasi essa avesse una sorta di «virtù di calamita» che la rendeva atta a «sostenere i corpi gravi co' quali ella è contigua»⁴². Per illustrare tale virtù egli ricorreva a una semplice esperienza: si prenda una palla di cera con all'interno una quantità di piombo tale da far sì che essa venga sommersa quasi completamente dall'acqua, eccetto la sommità. Essa rimarrà in questo stato fino a quando, bagnando la sommità, non si interrompa la contiguità tra l'aria e la superficie della palla: a questo punto essa andrà a fondo. Tuttavia, se prendiamo un bicchiere capovolto e lo immergiamo lentamente in acqua, in modo da riportare una quantità d'aria a contatto con la sommità della palla, ritirando nuovamente tale bicchiere vedremo che la palla si solleverà. È chiaro, quindi, che dev'essere l'aria a sostenere la palla⁴³.

Al di là degli altri aspetti delle spiegazioni galileiane, quello che qui interessa sottolineare è l'idea, condivisa dagli aristotelici, che l'acqua, così come l'aria, non esercitino alcun peso in sé stesse. Fu principalmente tale convinzione che impedì non solo a Galileo, ma ad alcuni suoi illustri predecessori, di comprendere il ruolo della pressione. Davanti ai fenomeni del vuoto, Galileo faceva ricorso a una causa interna, una forza misurabile che esprimeva una tendenza all'unione che caratterizzava l'intero mondo naturale. I fenomeni del vuoto erano il risultato di una forza attrattiva, interna alla materia,

la cui causa era riconducibile alla presenza di infiniti interstizi tra gli atomi o le «minime particole» della materia. Lo scopo di Galileo era dimostrare che la teoria corpuscolare della materia consentiva di ottenere spiegazioni migliori dei fenomeni dei galleggianti rispetto alla teoria aristotelica dei quattro elementi. Come tutti i corpi, composti dalla stessa materia omogenea, anche l'acqua ha una struttura corpuscolare e l'unica resistenza che essi oppongono alla divisione è quella opposta dalla forza o resistenza del vuoto⁴⁴.

Il *Discorso* uscì a Firenze nel maggio 1612, seguito da una seconda edizione pubblicata prima della fine dell'anno. Esso suscitò una selva di reazioni: il primo a scrivere contro di lui fu Arturo d'Elci, Provveditore dello Studio di Pisa, che nell'estate del 1612, sotto lo pseudonimo di Accademico Incognito, diede alle stampe le *Considerazioni sopra il Discorso del Sig. G. G. intorno alle cose che stanno in su l'acqua o che in quella si muovono*⁴⁵. Prima della pubblicazione, d'Elci distribuì alcune copie latine di cui venne a conoscenza Tolomeo Nozzolini, lettore dello Studio di Pisa, che il 22 settembre 1612 scrisse all'arcivescovo di Firenze Monsignor Marzimedici. Nozzolini prendeva spunto dalle *Considerazioni* di d'Elci e dal *Discorso* per esprimere alcuni dubbi, in particolare su quella «virtù calamitica» dell'aria di cui Galileo si era servito per spiegare i fenomeni che apparentemente contraddicevano la teoria archimedeica. Seguendo la tradizione aristotelica, Nozzolini faceva notare che l'unica attrazione ammissibile era quella con cui la natura fuggiva la formazione del vuoto, e solo questa necessità poteva spingere gli elementi a muoversi seguendo direzioni contrarie ai rispettivi moti naturali: «non si vee mai attrazione di cosa alcuna contro alla sua natural propensione, se no per causa di fuggire 'l vacuo»⁴⁶. Così, secondo Nozzolini anche la palla di cera risaliva *ratione vacui*. Galileo rispose a gennaio dell'anno successivo, protestando che l'espressione «virtù calamitica» non era la sua, ma di uno dei suoi avversari che aveva frainteso la sua spiegazione del galleggiamento della tavoletta d'ebano. Egli ribadiva inoltre che la palla di cera risaliva a causa dell'aria contigua e non per un'ipotetica avversione della natura per il vuoto: «non ricorrerei a por desiderii di conservarsi o di altro nelle cose inanimate». La sua interpretazione dell'*horror vacui* era infatti diversa da quella degli aristotelici, e si fondava su «ragioni ed esperienze»⁴⁷.

Qualche anno dopo, l'11 aprile del 1615, Giovan Francesco Sagredo, nobile veneziano e amico fidato di Galileo, gli scrisse una lettera a proposito delle operazioni del termoscopio o «strumento dei temperamenti», uno strumento in vetro formato da un bulbo e da un cannello saldati insieme. Esso era stato protagonista di diversi esperimenti che Galileo aveva eseguito già durante i primi anni trascorsi a Padova. Tra questi ve n'era uno, riportato da Sagredo nella lettera, che sembrava particolarmente rilevante per la questione del vuoto. Esso consisteva prima nel riscaldare e poi raffreddare il termoscopio per osservare cosa accadeva al liquido al suo interno. Esposto a una fonte di calore, il termoscopio rivelava una discesa del liquido, mentre il successivo raffreddamento ne provocava la risalita. Come risulta da un brano della lettera di Sagredo, Galileo spiegava

il fenomeno con la condensazione e la successiva rarefazione dell'aria contenuta all'interno del termoscopio. Quando il bulbo veniva raffreddato, l'aria diminuiva di volume e, per evitare che si formasse il vuoto, il liquido risaliva per occupare lo spazio rimasto libero. Con il calore, il volume dell'aria aumentava, spingendo il liquido verso il basso. L'interpretazione galileiana di rarefazione e condensazione si fondava sulla concezione corpuscolare della materia: l'aria aveva al suo interno dei micro-vuoti, o vuoti disseminati, che venivano occupati dalle particelle quando il volume diminuiva e, nel caso della rarefazione, da quelli che Sagredo chiamava «spiriti ignei», ossia quegli «atomi ignei» che già nel *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua* Galileo aveva citato riprendendoli da Democrito per spiegare alcune anomalie che sembravano contraddire la teoria archimedeica dei galleggianti, e che supponeva fossero capaci di penetrare il vetro. Se il vuoto disseminato era quindi una realtà più che plausibile, sul vuoto separato Galileo manteneva una posizione di sostanziale rifiuto, seppur caratterizzata da qualche ambiguità. E infatti Sagredo faceva notare che anche ammettendo l'interpretazione galileiana dell'esperimento con il termoscopio, era comunque necessario «che s'abbia a concedere il vacuo». Non si trattava del vuoto disseminato, che già Galileo riconosceva, ma del vuoto separato, la cui esistenza era ricavabile da due esperimenti che Sagredo affermava di aver eseguito qualche tempo prima con un vaso di vetro fatto fabbricare appositamente dai maestri vetrai di Murano. La prima esperienza si fondava sull'assunto che nel vuoto i suoni non si trasmettono. Riscaldato il vaso, in modo che gli spiriti ignei vi penetrassero in quantità, vi aveva inserito un sonaglio da sparviero e lo aveva sigillato accuratamente. Se l'ipotesi era giusta, una volta che il vaso si fosse raffreddato e gli spiriti ignei fossero usciti, al suo interno si sarebbe formato il vuoto, dato che l'aria non poteva penetrarvi. In tal caso, il sonaglio non avrebbe dovuto emettere alcun suono, come in effetti accadde⁴⁸. Il secondo esperimento consisteva nel prendere lo stesso vaso e immergerlo dalla parte del collo in una bacinella piena d'acqua. Una volta aperto, l'acqua sali violentemente, il che confermava che esso era effettivamente vuoto. Nonostante continuasse a impiegare l'ipotesi degli spiriti ignei, Sagredo non ne era affatto convinto, poiché non esisteva un esperimento in grado di renderli evidenti ai sensi. Galileo dovette rimanere colpito da questa osservazione, e infatti i disegni che fece in calce alla lettera di Sagredo illustrano i suoi tentativi di ideare un esperimento per confermare quella che all'amico era apparsa come un'ipotesi gratuita⁴⁹.

Nel complesso, dunque, Galileo rifiutava la versione tradizionale dell'*horror vacui*, ma conservava l'idea di una virtù o una forza attrattiva del vuoto che agiva a livello microscopico, come emerge dalla corrispondenza con Giovanni Battista Baliani e dalle pagine dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Come abbiamo detto, le idee di Beeckman sul peso dell'aria rimasero sostanzialmente sconosciute ai contemporanei. Sebbene le avesse comunicate a Gassendi e Mersenne quando gli fecero visita nel 1629⁵⁰, non sembra che fossero note in Italia, dove all'epoca

dei fenomeni del vuoto, e in particolare del funzionamento dei sifoni, si stava occupando Giovanni Battista Baliani. Figlio di un senatore della Repubblica di Genova, Baliani affiancò gli studi di meccanica e teoria del moto alla carriera politico-amministrativa. Nel 1613, quando era prefetto della fortezza di Savona, incontrò Filippo Salviati, che lo descrisse a Galileo come un filosofo che «si ride di Aristotile et di tutti i Peripatetici. È buon geometra»⁵¹. Nel 1614 ha inizio il rapporto epistolare con Galileo. I due discutono, tra le altre cose, di metodo scientifico concordando, come scrisse Baliani, che ogni conclusione sulle operazioni della natura deve fondarsi su «dimostrazioni matematiche» ed «esperienze infallibili». A marzo Galileo gli scrisse esponendogli le ragioni in favore del sistema copernicano contro quello tychonico e un metodo di sua invenzione per determinare la proporzione tra il peso dell'aria e quello dell'acqua, quantificata in 1:460⁵². Nel 1615 Baliani andò a Firenze, dove conobbe di persona Galileo, discutendo con lui di moto accelerato, e sulla via del ritorno si fermò a Pisa, dove incontrò Benedetto Castelli. I contatti epistolari con Galileo ripresero nel 1630, quando Baliani gli sottopose un problema incontrato nella costruzione di una condotta idraulica che avrebbe dovuto sollevare l'acqua a un'altezza di 84 palmi genovesi, ossia poco meno di 21 metri. Nonostante il sifone di rame non presentasse alcuna perdita, ogni tentativo si era rivelato fallimentare. Baliani non riusciva a capacitarsene, ma un altro fenomeno lo aveva sorpreso ancora di più. Aprendo una delle bocche del sifone, l'acqua non defluiva completamente, ma si attestava all'altezza di 42 palmi. Dato che il dispositivo idraulico non presentava «meati sensibili», ciò non poteva accadere «senza che vi rimanga vacuo»⁵³.

Come Galileo spiegò pochi giorni dopo, quello che sembrava un malfunzionamento in realtà era dovuto all'esistenza di un limite oltre il quale i sifoni e le pompe aspiranti smettevano di funzionare, indipendentemente dal diametro e dall'altezza. Nella lettera a Baliani Galileo quantificava questo limite in venti braccia fiorentine, mentre nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche* parlerà di diciotto braccia, ossia circa 10,5 metri (1 braccio=0,583 m). A questa conclusione era possibile giungere considerando che all'acqua, come al canapo di una nave, non può essere applicata una forza infinita. Oltre un certo limite, come la corda con un peso attaccato deve necessariamente rompersi, così l'acqua, che si solleva verso l'alto per riempire uno spazio che altrimenti rimarrebbe vuoto, collassa sotto il proprio peso. Anzi, una corda d'acqua cederà più facilmente di un canapo perché, come già aveva anticipato nel *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua*, la struttura corpuscolare dell'acqua è tale da non opporre alcuna resistenza alla divisione se non quella «del vacuo succedente alla divisione», mentre nei corpi solidi la coesione è garantita anche da un altro «tenacissimo attaccamento delle parti»⁵⁴. Baliani rispose quasi tre mesi dopo, il 27 ottobre 1614, con una lettera in cui esprimeva alcuni dubbi, non tanto sul limite stabilito da Galileo, quanto piuttosto sulla sua spiegazione. In effetti, l'acqua nel sifone si attestava a 42 palmi, ossia all'altezza indicata da Galileo (42

palmi genovesi equivalgono infatti a 10,5 metri circa). Quest'ultimo però non aveva proferito parola sulla natura dello spazio al di sopra della colonna d'acqua, che per Baliani era effettivamente vuoto. Anzi, Baliani confessava di esser giunto alla conclusione «naturalmente il vacuo si dia» proprio dopo essersi reso conto che l'aria è un corpo grave come tutti gli altri, e aver appreso da Galileo il metodo per calcolarne il peso nel 1614. Come aveva fatto Beeckman, Baliani estendeva la spiegazione idrostatica ai fenomeni del vuoto. Egli ripeteva la prova che Stevin aveva prodotto per l'acqua e Beeckman per l'aria, anche se non è dato sapere con certezza se egli avesse avuto accesso alle idee di Beeckman⁵⁵. Comunque sia, Baliani riconosceva la pressione dell'aria in sé stessa e in tutte le direzioni, lasciando così cadere l'opinione secondo cui gli elementi non pesano in sé stessi. Tale pressione si esercita uniformemente in tutte le direzioni, ed è per questa ragione che non ne avvertiamo il peso, esattamente come un uomo immerso in acqua riesce a sopportare la pressione mentre è immerso in acqua. Essa inoltre aumenta in proporzione alla profondità dell'acqua o all'altezza dell'atmosfera. Anzi, Baliani andava oltre, ipotizzando che il peso dell'aria fosse minore negli strati più alti dell'atmosfera. In conclusione, per creare il vuoto era quindi necessaria una forza capace di separare le parti inferiori dell'aria dalle superiori, come accade nell'acqua; questa forza è proporzionale all'altezza e al peso della colonna d'aria sovrastante, tenuto conto che il peso dell'aria varia con l'altezza⁵⁶.

Negli anni successivi Galileo continuò a riflettere sul vuoto e sulla struttura corpuscolare della materia, ma senza prendere in considerazione le idee di Baliani sulla pressione, perseverando nella convinzione che l'aria non pesa in sé stessa. Egli tornò sul problema del vuoto nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due scienze*, pubblicati a Leida nell'estate del 1638. L'opera si compone di quattro dialoghi, cui protagonisti sono gli stessi del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632): Salviati, portavoce del pensiero di Galileo, Sagredo e il peripatetico Simplicio. I *Discorsi* contengono quelli che Galileo definì «i frutti più stimati da me di tutti i miei studi»⁵⁷; essi quindi ci consegnano il suo testamento scientifico, comprese quelle che furono le sue concezioni definitive sulla struttura della materia e sul vuoto. Esse sono contenute nella Giornata Prima, nel corso della quale vengono gettate le basi della scienza della resistenza dei materiali. È in questo contesto che Galileo ridiscute la «resistenza del vacuo» di cui aveva parlato a Baliani e descrive un metodo per misurarla, discute la famosa esperienza delle superfici a contatto diretto, presenta una spiegazione dei fenomeni di rarefazione e condensazione, e infine confuta il più celebre degli argomenti aristotelici contro il vuoto. L'impossibilità di separare due lastre di marmo o di altro materiale perfettamente levigato, come il vetro o un metallo, dimostra «l'orrore della natura nel dover ammettere, se ben per breve momento di tempo, lo spazio vuoto che tra di quelle rimarrebbe». Una ragione, questa, che assomigliava a quella addotta da Lucrezio: dal momento che l'aria non può muoversi con velocità infinita, una volta separate le due lastre si sarebbe

necessariamente formato il vuoto. Come spiega Salviati, la forza che le tiene unite è la medesima che presiede alla coesione dei corpi solidi, alla quale bisogna aggiungere un qualche altro «glutine, visco o colla», come Galileo aveva già affermato nella lettera a Baliani.

Tuttavia, nei *Discorsi* l'interpretazione galileiana della coesione è cambiata rispetto al 1630, come dimostrano le obiezioni di Sagredo, il quale dubita che il vuoto sia la causa che tiene insieme le due lastre di marmo. Oltre a non essere convinto dalla tradizionale versione dell'*horror vacui* – «converrà dunque dire», afferma Sagredo, «che pur per violenza o contro natura il vacuo talor si conceda (benché l'opinion mia è che nissuna cosa sia contro a natura, salvo che l'impossibile)», Sagredo osserva giustamente che una causa deve essere anteriore a un fenomeno, ma in questo caso il vuoto è piuttosto ciò che seguirebbe dalla separazione delle lastre. Incalzato dalle obiezioni dell'interlocutore, Salviati ribadisce che la resistenza del vuoto non soltanto ha una parte nella coesione, ma è altresì possibile misurare questa resistenza, come mostra un esperimento condotto con un vaso di vetro, un'asta di ferro con un'estremità a forma di cono rovesciato e dall'altra un uncino a cui appendere il peso corrispondente alla forza del vuoto, e un cilindro di legno o «zaffo» che calzi perfettamente nella cavità del vaso, con al centro un foro da cui far passare l'asta di ferro. Una volta riempito parzialmente il vaso con dell'acqua, si inserisce il cilindro di legno in modo che questo venga a contatto con l'acqua. Successivamente l'asta viene sollevata, dimodoché tra il tappo e il cilindro rimanga uno spazio sufficiente da permettere la fuoriuscita dell'aria. Poi l'asta viene tirata in modo che l'estremità a cono sigilli il foro centrale, e infine si posiziona l'intero apparato in modo da poter attaccare all'uncino un recipiente, nel quale verrà versata della sabbia finché il peso non provocherà lo scollamento della superficie dell'acqua e di quella del cilindro di legno. La somma dei pesi della sabbia, del recipiente e dell'asta di ferro darà la misura della forza del vuoto. A conferma dell'attendibilità di tale esperimento vi è proprio il limite delle pompe aspiranti enunciato per la prima volta nella lettera a Baliani.

Come abbiamo appena osservato, il contenuto della Giornata Prima rappresenta quella che fu l'evoluzione delle idee di Galileo sul vuoto dall'epoca della corrispondenza con Baliani. Infatti, la resistenza o forza del vuoto finisce per essere l'unica causa della coesione, tanto nei fluidi quanto nei solidi. Sotto la pressione delle obiezioni di Sagredo, Salviati infatti riconosce, seppur in via ipotetica, che la resistenza del vuoto potrebbe essere l'unica causa dell'unione delle particelle che compongono i solidi. L'attrazione esercitata dai vuoti interstiziali che separano le «minime particole» spiegherebbe così la resistenza di queste ultime ad esser separate. Una tale ipotesi sembrerebbe inoltre trovare una conferma nella fusione dei metalli: il fuoco separa le singole particelle dei metalli, che raffreddandosi tornano ad unirsi senza che vi sia una sensibile perdita di peso. Nel prosieguo del dialogo il problema della struttura della materia e quello dell'esistenza del vuoto vengono affrontati con le armi dell'analisi matematica. Ai corpuscoli dei solidi

materiali corrispondono i punti dei solidi geometrici, ai vuoti interstiziali i vuoti non quanti. Quindi i vuoti interstiziali si danno anche nel caso delle grandezze geometriche, che però sono grandezze continue, a differenza delle grandezze fisiche discrete. Il continuo geometrico è formato da infiniti punti privi di estensione e da infiniti vuoti non quanti. A partire da questa concezione Galileo risolve il paradosso della ruota di Aristotele, e da qui muove alla spiegazione dei fenomeni di rarefazione e condensazione. Il paradosso è enunciato nella XXIV delle *Questioni meccaniche* pseudo-aristoteliche. In breve, ci si domanda perché, presi due cerchi concentrici, il cerchio minore, compiendo una rotazione di 360°, descrive una linea uguale a quella tracciata dalla circonferenza maggiore, mentre invece, se prendiamo i due cerchi separatamente, le rotazioni producono linee di lunghezza diversa, che tra loro hanno la stessa proporzione che vi è tra le lunghezze della circonferenza. Galileo affronta la questione studiando due diversi esagoni equilateri ed equiangoli, che immagina di far ruotare simultaneamente sulla stessa linea. Dovendo seguire il moto dell'esagono maggiore, il minore compirà dei piccoli salti lungo la tangente, ognuno dei quali equivale al rapporto tra il suo lato e il lato dell'esagono maggiore. Ma dato che un cerchio altro non è se non un poligono con un numero infinito di lati, ai salti dell'esagono minore corrispondono infiniti vuoti non quanti che 'separano' i punti della linea descritta dal cerchio minore.

I vuoti infiniti non quanti e la corrispondenza tra modello geometrico e realtà fisica consentiva a Galileo di superare il dilemma che si poneva nella spiegazione dei fenomeni di rarefazione e condensazione, consistente nel dover scegliere tra la penetrazione dei corpi e il vuoto separato, la prima dottrina assurda, la seconda empirica. Senza tener conto che agli occhi di Galileo la corrispondenza tra realtà fisica e modello geometrico sembrava trovare una conferma anche a livello empirico, nelle «maniere che tengono gli artefici in condur l'oro tirato», ossia nell'applicare lamine d'oro a verghe d'argento, e nelle «immense rarefazioni» che si osservano nelle esplosioni, dove da una minuscola quantità di polvere da sparo si produce «una mole vastissima di fuoco» e «un'espansione, direi quasi senza termine, della sua luce»⁵⁸.

Infine, nell'ultima parte della Giornata Prima troviamo la confutazione dell'argomento aristotelico dell'istantaneità del moto nel vuoto e l'affermazione che nel vuoto tutti i corpi cadono con la stessa velocità. Contrariamente a quanto aveva creduto in passato, Galileo si era reso conto che a parità di mezzo, il peso specifico di un corpo non influisce sulla sua velocità di caduta. Allo stesso modo, in mezzi di diversa densità, la proporzione tra le velocità non rispecchia quella tra la densità dei mezzi. Se fosse possibile creare il vuoto in natura, ragionava Salviati, potremmo vedere direttamente cosa accade a un grave in caduta libera. Ma il vuoto separato non è ottenibile artificialmente – su questo tema Galileo conservò una certa ambiguità –, quindi è sufficiente considerare cosa accadrebbe a un corpo che si muove in mezzi sempre meno resistenti, ossia di densità decrescente. Considerato che le differenze tra i gradi successivi di velocità diminuiscono

progressivamente man mano che la densità (e quindi la resistenza diminuisce), si può concludere che tali differenze diminuiranno fino a diventare infinitamente piccole. Nel vuoto, dove non vi è resistenza, le differenze tra i gradi di velocità saranno nulle, per cui tutti i corpi, indipendentemente dalla loro natura – ossia dal loro peso specifico e dalle loro dimensioni – si muoveranno con pari velocità.

Uno dei primi filosofi a leggere e commentare i *Discorsi* di Galileo fu René Descartes. Nell'ottobre del 1638 scrisse a Mersenne esprimendo un giudizio tutto sommato positivo sull'opera, sebbene non approvasse la tendenza di Galileo a soffermarsi su spiegazioni di fenomeni particolari «senza aver considerato le cause prime della natura». Tra i vari passaggi che lo avevano colpito, vi era quello relativo all'esperimento delle lastre di marmo. Descartes rifiutava decisamente l'interpretazione galileiana:

[Galileo] indica due cause per cui le parti di un corpo continuo si tengono insieme: l'una è la paura del vuoto, l'altra è una certa colla o unione che le tiene assieme, che spiega ancora tramite il vuoto. Io le ritengo entrambe completamente false. Quanto attribuisce al vuoto (pagina 13) non deve essere attribuito che alla pesantezza dell'aria [...] e l'osservazione che le pompe non tirano l'acqua a più di 18 braccia di altezza deve essere ricondotta al vuoto, ma alla materia delle pompe o a quella della stessa acqua, che scorre via tra la pompa e il tubo piuttosto che salire più in alto⁵⁹.

Nella filosofia naturale cartesiana il vuoto non aveva alcuna cittadinanza, dunque non poteva essere causa di alcunché. All'epoca Descartes aveva già elaborato i fondamenti della teoria dei vortici con cui spiegava i fenomeni del vuoto, una versione moderna dell'antiperistasi. Egli riconosceva il peso dell'aria, e la paragonava a un ammasso di filamenti simili alla lana, ma negava che essa avesse un peso in sé stessa. La ragione per cui al suo interno quel peso non veniva avvertito era da ricondurre alla presenza dell'etere tra i pori dell'aria e al suo movimento caratteristico, assimilabile a quello dei «vortici di vento» (*tourbillons*)⁶⁰. Inoltre, come è evidente dal passaggio citato, Descartes pensava che il limite fissato alla capacità delle pompe aspiranti fosse da ricondurre a difetti di fabbricazione e non all'orrore della natura per il vuoto.

Nell'immediato in Italia i *Discorsi* produssero ben altri sviluppi. Essi stimolarono i discepoli di Galileo ad approfondire la possibilità di ottenere artificialmente il vuoto, forse a partire proprio dall'esperimento per misurare la «resistenza del vacuo» che abbiamo descritto sopra. Tra la fine degli anni trenta e i primi anni quaranta Roma fu il teatro delle ricerche sul vuoto. Qui era attivo un gruppo di galileiani che si raccoglieva intorno a Raffaello Magiotti (1597-1656), arrivato nella capitale nel 1630 come segretario del cardinale Giulio Cesare Sacchetti. Dopo aver studiato alla scuola di Benedetto Castelli, ed essere diventato, nel 1636, *scriptor* della Biblioteca Vaticana, nel 1638 era stato indicato da Castelli per la cattedra di matematica allo Studio di Pisa, incarico che però aveva rifiutato. Alla scuola di Castelli si era formato anche Evangelista Torricelli

(1608-1647), che all'epoca era segretario di Monsignor Giovanni Ciampoli, ma che con Magiotti e Antonio Nardi il «triunvirato» romano dei discepoli di Galileo⁶¹. Della stessa cerchia faceva parte anche Gaspare (o Gasparo) Berti (1600 ca-1643), protagonista dell'esperimento che gli storici considerano l'anticipazione dell'esperienza barometrica di Torricelli.⁶²

La stampa dei *Discorsi* terminò nel luglio del 1638; le prime copie giunsero a Roma in dicembre e andarono esaurite quasi immediatamente. L'accoglienza era stata a dir poco entusiastica, come Castelli scrisse a Galileo nel febbraio del 1639, e dovette esserlo ancor di più all'interno della cerchia di Magiotti⁶³. Diversi anni dopo, nel marzo del 1648, quest'ultimo scrisse a Mersenne una lettera in cui rispondeva alla richiesta di dettagli sull'«istoria dell'argento vivo». L'esperimento di Torricelli era già stato replicato con successo sul suolo francese da Petit e Pascal, e quest'ultimo aveva già pubblicato le *Expériences nouvelles touchant le vide*. Magiotti si occupava invece dell'esperimento di Berti, ma all'inizio di quella storia egli poneva il limite delle pompe aspiranti scoperto da Galileo e le «sue speculationi intorno a quello posto nell'opera della resistenza dei solidi»⁶⁴. I discepoli di Galileo probabilmente si interrogarono sulla natura dello spazio che rimaneva tra lo «zaffo» e l'acqua dopo lo scollamento delle due superfici. In ogni caso, come osservava de Waard, la lettura dei *Discorsi* dovette spingerli a tentare l'esperienza del vuoto in una forma più agevole, o addirittura fu lo stesso Galileo a indicare la strada⁶⁵. L'esperimento fu realizzato a Roma tra il 1639 e il 1640 da Gaspare Berti nel cortile della sua residenza, probabilmente mentre Galileo era ancora vivo, come dimostra un passaggio della lettera di Magiotti, secondo cui lo scopo di Berti era convincere Galileo che era possibile sollevare l'acqua a più di 18 braccia⁶⁶. Berti viveva allora in un edificio di tre piani, la cui facciata gli servì per fissare il tubo di piombo di circa undici metri che costituiva la parte principale dell'apparato sperimentale. Oltre alla citata lettera di Magiotti a Mersenne, di questo esperimento esistono diversi resoconti, tuttavia pubblicati a diversi anni di distanza.

Il primo a scriverne fu il padre gesuita Niccolò Zucchi (1586-1670), seguito da un altro famoso gesuita, Athanasius Kircher (1601/2-1680)⁶⁷, e infine il padre minimo Emanuel Maignan (1601- 1676), che all'epoca insegnava teologia e filosofia presso il convento dei minimi di Monte Pincio. Quest'ultimo è l'autore del resoconto più completo, pubblicato nel suo *Cursus philosophicus* (1653). Stando a quanto scrive Maignan, fu Berti stesso a descrivergli l'esperienza e le circostanze in cui si svolse, nonché gli interrogativi che suscitò. Non sembra invece che Torricelli fosse presente, nonostante in quel periodo si trovasse a Roma. Al contrario, Magiotti, Kircher e Zucchi furono testimoni diretti. L'apparato di Berti consisteva, come si è detto, in un lungo tubo di piombo, alla cui estremità superiore era stato montato un vaso di vetro a forma di fiasco, mentre l'estremità inferiore recava un rubinetto per permettere all'acqua contenuta nel tubo di defluire liberamente. Inoltre, appena sotto il fiasco di vetro era stato praticato un foro, dove era

stato inserito e saldato un tubo di piombo ricurvo. Anche quest'ultimo era provvisto di una valvola, montata sull'altra estremità che terminava in un vaso pieno d'acqua. L'estremità inferiore del tubo era poi immersa in una tinozza, anch'essa piena d'acqua. L'esperimento fu eseguito in due versioni: la prima contemplava unicamente l'uso del tubo più lungo: una volta che era stato riempito d'acqua, Berti aveva aperto il rubinetto inferiore, osservando che, una volta sottratta l'altezza della parte immersa nella tinozza, il liquido si fermava a diciotto braccia, come aveva stabilito Galileo. A questo punto rimaneva da chiarire di che natura fosse lo spazio rimasto al di sopra della colonna d'acqua. A tal proposito, come racconta Maignan, Berti eseguì l'esperimento con alcune modifiche: praticò un foro nel tubo e vi inserì un altro tubo più sottile e più corto, anch'esso provvisto di una valvola; poi lo immerse in una bacinella sistemata sul davanzale della finestra, e aprì il rubinetto del tubo più grande finché il livello dell'acqua si assestò all'altezza di diciotto braccia. A questo punto, aprendo la valvola del tubo più piccolo, l'acqua contenuta nella bacinella fu risucchiata finché non riempì completamente lo spazio apparentemente vuoto sopra la colonna di diciotto braccia. In questo spazio apparve però una bolla, la cui natura fu materia di discussione tra i presenti, esattamente come la natura dello spazio che era rimasto al di sopra della superficie dell'acqua contenuta nel tubo più grande. Gli aristotelici sostenevano che esso fosse pieno di aria, mentre Berti e i galileiani pensavano fosse vuoto. I peripatetici suggerivano la possibilità che l'aria fosse entrata o attraverso i porti del vetro, oppure che fosse risalita dal rubinetto nello spazio tra l'acqua e le pareti del tubo, o infine che si fosse liberata dall'acqua stessa. Secondo i gesuiti, lo spazio non era né vuoto né pieno d'aria, ma pieno di certi corpi sottili che penetrano attraverso le pareti del tubo. Vedendo che la luce passava attraverso quello spazio, e tenendo conto dell'opinione di Aristotele secondo cui nel vuoto non sarebbe stato possibile vedere, essi lo considerarono pieno. Tuttavia, secondo quanto riporta Kircher, molti ritennero che esso fosse autenticamente vuoto. Per dirimere la questione Kircher all'epoca aveva inoltre proposto di inserire nel fiasco un sonaglio, esattamente come aveva fatto Sagredo, e di muoverlo con l'ausilio di una calamita.

L'esperimento, secondo quanto riportato da Kircher e Zucchi, fu eseguito da Berti con il loro aiuto parecchio tempo dopo, ma fu un insuccesso a causa dell'imperfezione dell'apparato sperimentale; Berti riferì inoltre che si era formata una bolla d'aria nella sommità del tubo. Sette o otto giorni dopo la costruzione del dispositivo, Berti contattò Maignan che non era riuscito a presenziare all'esperimento, che si schierò dalla parte dei vacuisti, pronunciandosi anche sulla causa che sostiene l'acqua nel tubo, la stessa indicata da Beeckman nel 1618 nella sua tesi di dottorato e da Baliani nel 1630. Se prestiamo fede a Maignan, intorno al 1640 l'ipotesi della pressione uniforme si era diffusa anche a Roma. Pur scrivendo ad anni di distanza, Maignan riportava di aver confidato a Berti che a sostenere l'acqua era «la forza dell'aria circostante», ossia la pressione atmosferica, e che non era affatto irragionevole supporre che lo spazio fosse autenticamente vuoto. A tal

proposito, l'obiezione che solitamente veniva sollevata contro il vuoto, ossia che in quello spazio era possibile vedere attraverso, e che quindi la luce doveva essere presente, Maignan rispose affermando che la luce non è, come sostenevano gli aristotelici, un accidente, ma un «corpo reale», ossia una sostanza materiale, esattamente come lo sono gli «spiriti» emessi dal magnete⁶⁸.

Come è stato osservato dagli storici, l'esperimento di Berti sembrò mettere in difficoltà i sostenitori del vuoto, e non soltanto perché nello spazio al di sopra della colonna d'acqua rimaneva trasparente. Come riporta Magiotti nella lettera a Mersenne, man mano che l'acqua scendeva nel sifone si formavano delle bolle che salivano verso l'alto; «quelle pulighe mi son rimaste sempre nella mente», scriveva, e la ragione dei dubbi stava evidentemente nel fatto che era difficile pensare che fossero formate da aria, poiché se questa fosse entrata nel tubo, l'acqua doveva cadere invece che rimanere sospesa. Di certo, dovevano essere formate da una qualche materia o «robba», come la definì Magiotti, diversa dall'aria, sulla cui natura però non si pronunciava⁶⁹.

Dopo l'esperimento di Berti sembra che anche il gesuita Honoré Fabri avesse realizzato un esperimento *de vacuo*, probabilmente una versione diversa dell'esperienza di Galileo per misurare la forza del vuoto⁷⁰. Comunque sia, fu l'esperimento romano a stimolare il dibattito tra i galileiani che culminò con l'esperienza barometrica eseguita da Viviani e Torricelli.

IV. L'ESPERIMENTO DI TORRICELLI-VIVIANI

Nei primi mesi del 1641 Torricelli era rientrato a Roma, dopo circa nove anni passati in giro per l'Italia al seguito di Monsignor Giovanni Ciampoli. Qui mostrò a Castelli il trattato sulla caduta dei gravi e il moto dei proietti intitolato *De motu gravium naturaliter descentium et proietorum*, pubblicato nel 1644 nell'*Opera geometrica*, l'unica opera che diede alle stampe ancora in vita; tramite Castelli il trattato giunse nelle mani di Galileo, che rimase così colpito dal talento matematico di Torricelli da chiamarlo a collaborare con lui. Nel frattempo, però, Castelli si era allontanato da Roma, chiedendo a Torricelli di sostituirlo nelle lezioni di geometria e fortificazioni che teneva alla Sapienza, il che ritardò la sua partenza per Arcetri, dove finalmente arrivò il 10 ottobre di quell'anno. Galileo morirà di lì a poco, l'8 gennaio 1642; in quei pochi mesi, Torricelli lo aiutò nella stesura della Giornata Quinta dei *Discorsi*. Dopo la morte del maestro, gli fu offerto l'incarico di lettore di matematica presso lo Studio fiorentino e subito dopo quello di Matematico, ma non di Filosofo, del Granduca Ferdinando II⁷¹. Non vi sono testimonianze della presenza di Torricelli all'esperimento di Berti, al quale invece pare abbia assistito Michelangelo Ricci (1619-1682), allora poco più che ventenne, il quale sosteneva che le bolle che risalivano nel sifone erano dovute all'aria mescolata con l'acqua⁷².

Berti morì il 23 agosto 1643, all'età di quarantadue anni, poco dopo essere stato chiamato a succedere a Castelli sulla cattedra di matematica della Sapienza⁷³. Attraverso una minuziosa analisi della documentazione è stato possibile ricostruire i rapporti tra i discepoli di Galileo e allievi di Castelli, Maignan e un altro frate minore, Jean-François Nicéron (1613-1646), allievo di Mersenne, che dal 1639 insegnava matematica al convento dei Minimi sul Monte Pincio o Trinità dei Monti, centro del dibattito intellettuale romano. Dopo la partenza di Torricelli per Arcetri, a Roma si ricominciò a discutere dell'esperienza di Berti e, più in generale, dell'esistenza del vuoto. La rete di relazioni che emerge da questo quadro suggerisce che Maignan doveva aver comunicato anche agli altri, tra cui Torricelli, le proprie idee sulla pressione dell'aria. Inoltre, è possibile che Ricci e Magiotti abbiano cercato l'opinione di Torricelli sull'uso dell'apparato sperimentale di Berti come barometro⁷⁴. Certo è che Magiotti nel 1647 raccontò a Mersenne di aver suggerito a Torricelli di impiegare l'acqua di mare al posto dell'acqua dolce utilizzata da Berti: «Hor io scrissi quest'esperienza al Sig. Torricelli, credendo che se l'acqua fusse stata di mare e prò più grave, ella non si sarebbe fermata in N, ma più in basso; fecero l'esperienze et arrivano fino all'argento vivo, restando sempre salde le massime del Sig. Galilei, con le nuove speculazioni et esperienze del Sig. Torricelli»⁷⁵. Tale indicazione trova una giustificazione in quanto Galileo aveva insegnato nei *Discorsi*, ossia che l'altezza massima a cui è possibile sollevare un fluido dipende dal peso specifico di quel fluido. Nel caso dell'acqua era di diciotto braccia, ma con liquidi dal peso specifico maggiore, il limite sarebbe stato minore. Di conseguenza, era possibile ripetere l'esperienza di Berti con un apparato meno ingombrante, magari impiegando del mercurio.

Nonostante la testimonianza di Magiotti, non è tuttavia chiaro come Torricelli sia arrivato a pensare al mercurio. Diversi anni orsono William Middleton aveva richiamato l'attenzione su un'annotazione di Viviani a una copia dell'edizione dei *Discorsi* del 1638, proprio in corrispondenza del passaggio in cui Salviati spiega che l'acqua non può essere sollevata oltre le diciotto braccia:

L'istesso per mio credere seguirebbe negli altri liquidi, come nell'arg[en]to vivo, nel vino, nell'olio &c., nei quali si farebbe lo strappam[en]to in minor, o in maggiore altezza delle 18 braccia, secondo la maggiore o minor gravità in specie di essi liquidi rispetto a quella dell'acqua, reciprocamente, misurando tali altezze sempre a perpendicolo⁷⁶.

Secondo Middleton la nota di Viviani offre una prova indiretta del ruolo di Galileo nella decisione dei due discepoli di utilizzare il mercurio nell'esperimento del 1644; tuttavia, nell'Edizione Nazionale Favaro non la classifica tra le postille che avevano ottenuto l'approvazione di Galileo, aggiunte sotto dettatura dello stesso Galileo da padre Clemente Settimi, e poi ricopiate da Viviani⁷⁷. Il fatto che l'altezza della colonna del

liquido fosse posta in relazione con il peso specifico induce naturalmente a pensare che l'annotazione fosse effettivamente il frutto di un suggerimento di Galileo, il cui metodo per misurare la forza del vuoto implicava appunto che questa variasse in relazione al peso specifico, anche se nei *Discorsi* non lo troviamo affermato esplicitamente. Salviati infatti presenta una generalizzazione di quel metodo, ma sempre in relazione al peso di una colonna d'acqua di diciotto braccia⁷⁸. Comunque sia, le osservazioni di Middleton confermano quanto feconda fu l'eredità dei *Discorsi* per il dibattito sul vuoto. Tra il 1643 e l'anno successivo sembra sia stato Viviani a dedicarsi alle ricerche che porteranno al celebre esperimento descritto nella lettera di Torricelli a Ricci. Il primo resoconto completo delle vicende che portarono all'esperienza barometrica lo dobbiamo a Carlo Dati (1619-1676), il filologo fiorentino che nel 1663 pubblicò, sotto lo pseudonimo di Timauro Antiate, *Della Vera Storia della Cicloide e della Famosissima Esperienza dell'argento vivo*, una lettera indirizzata ai Filaleti in cui intendeva rivendicare la priorità di Torricelli sia per la misurazione della cicloide che per l'esperimento barometrico. Riguardo alla prima questione, nel 1646 Roberval ne aveva rivendicato la priorità, dopo che, qualche anno prima, Torricelli aveva inviato a Mersenne le ricerche matematiche sul problema della quadratura della cicloide, pubblicate nell'*Opera Geometrica*. Dispute sulla priorità dell'esperimento con il mercurio erano sorte, come vedremo, dopo che Valeriano Magni lo aveva eseguito in Polonia e Pascal in Francia. In ogni caso, Carlo Dati riferiva che dopo aver letto i *Discorsi*, Torricelli pensò di sostituire all'acqua il mercurio, in quanto, avendo un peso specifico maggiore, esso avrebbe consentito di «somministrare una commoda operazione per fare il vacuo dentro a spazio minore assai». Calcolò quindi per realizzare l'esperimento era sufficiente un tubo di vetro di due braccia, ossia poco meno di un metro e venti centimetri, chiuso a una delle estremità. Confidata l'idea a Viviani, questi si occupò dei dettagli pratici: fece fabbricare il tubo e si procurò il mercurio, realizzando l'esperimento che Torricelli riportò nella celebre lettera a Ricci del giugno 1644⁷⁹.

Con l'esperimento barometrico Torricelli non mirava semplicemente alla produzione del vuoto. Come spiegava all'inizio della lettera a Ricci, la «sperienza filosofica intorno al vacuo» aveva l'obiettivo di osservare gli effetti delle «mutuazioni dell'aria», ossia delle variazioni di pressione concomitanti ai cambiamenti nella gravità dell'aria. Nella disputa tra vacuisti e pienisti prendeva comunque le parti dei primi. In natura non esisteva nessuna tendenza a fuggire il vuoto, e gli effetti che ordinariamente venivano attribuiti a tale orrore o, come aveva fatto Galileo, alla «resistenza del vacuo», erano in realtà dovuti al peso dell'aria. È bene precisare che Torricelli non distingueva chiaramente il peso dalla pressione e adottava la misura della gravità dell'aria fornita da Galileo, precisando però che la proporzione stabilita dal maestro – «la 1/400 parte del peso dell'acqua» – diminuiva al crescere dell'altezza. L'esperimento fu eseguito con due diversi tipi di tubi e un vaso o «catinella». Il primo era semplicemente chiuso ad una delle due estremità, mentre il

secondo terminava con un bulbo. Riempiti i due tubi con il mercurio, furono capovolti tenendo l'apertura tappata con un dito e immersi nella catinella piena per metà d'acqua e metà di mercurio. Tolto il dito, il mercurio scendeva fino ad attestarsi a circa 76 centimetri, mentre nella parte superiore del tubo si formava il vuoto, come dimostrava il fatto che sollevando il tubo fino al livello dell'acqua, questa entrava «con impeto horribile» prendendo il posto dell'argento vivo. L'esperimento dimostrava che la causa della sospensione della colonnina di mercurio non era interna al tubo, ma esterna. In altre parole, non era la forza del vuoto di Galileo, ma il peso dell'aria. Infatti, il mercurio si fermava sempre alla stessa altezza sia nel tubo con il bulbo sia nell'altro. Se la causa fosse stata interna, la resistenza del vuoto avrebbe dovuto essere maggiore nel tubo con il bulbo perché il vuoto qui era maggiore: «più forza haverebbe avuto il vaso AE, dove era più robba rarefatta et attraente, e molto più gagliarda per la rarefazione maggiore che quella del pochissimo spazio B»⁸⁰. Quindi era l'aria che, in virtù della sua gravità, premeva sulla superficie del mercurio nella catinella, esercitando quella forza necessaria a controbilanciare il peso di una colonna di mercurio alta 76 centimetri.

Non tutti però erano pronti ad accettare le conclusioni di Torricelli, a partire dall'amico Ricci, che il 18 giugno rispose con tre obiezioni. La lettera si apriva con alcune considerazioni sull'associazione tra il vuoto e l'odiata filosofia di Epicuro e Lucrezio, che i teologi avversavano a tal punto da affermare che nemmeno Dio poteva vincere quella tendenza all'unione e alla conservazione presente in natura. Non era tuttavia il sospetto di epicureismo a spingere Ricci a contestare le conclusioni di Torricelli. Eppure, l'idea che il peso dell'aria fosse responsabile della sospensione del mercurio non lo convinceva. Forse perché sapeva, come osservava nella prima obiezione, che coprendo la catinella in modo da escludere la pressione, il mercurio si attestava comunque al medesimo livello. Inoltre, tappando il foro di uno schizzatoio, ossia una pompa a stantuffo, la resistenza incontrata tirando lo stantuffo non varia qualsiasi sia la posizione in cui viene tenuto lo strumento. Se infatti il peso dell'aria si esercita in direzione verticale, dall'alto verso il basso, capovolgendo lo schizzatoio l'effetto dovrebbe cessare, cosa che invece non accade. Infine, immergendo un corpo in acqua, secondo quanto insegnano Archimede e Galileo, esso controbilancia il peso del liquido che sposta. Il mercurio nel tubo può dunque controbilanciare soltanto l'aria che sposta, e non tutta l'aria che preme sulla superficie del mercurio. Interrogandosi sulla ragione per cui le pompe continuava a funzionare anche in luoghi chiusi Beeckman aveva già risposto alla prima obiezione di Ricci. Nella lettera del 28 giugno Torricelli riprendeva sostanzialmente la concezione della struttura dell'aria dell'olandese: essa è un corpo elastico, paragonabile a un ammasso di lana; gli strati inferiori sono continuamente compressi da quelli superiori, il che porta a concludere che la forza che essi esercitano sulla superficie del mercurio rimane invariata, pur escludendo l'azione dell'aria sovrastante. L'analogia con la lana era già stata impiegata da Descartes e, come vedremo, sarà ripresa anche da Boyle.

Nella sua prima risposta Ricci accennava all'avversione dei teologi per il vuoto a causa dell'associazione con le dottrine di Epicuro e Lucrezio. In Italia l'atomismo incontrò infatti una crescente opposizione soprattutto a partire dagli anni trenta del Seicento. Prima ancora, la pubblicazione del *Saggiatore* nel 1623 aveva suscitato la reazione degli ambienti cattolici, soprattutto per la minaccia che la dottrina galileiana delle qualità primarie e secondarie poneva al dogma della transustanziazione stabilito dal concilio di Trento. È probabile che la crescente ostilità dei Gesuiti per l'atomismo abbia indotto Torricelli e gli altri discepoli di Galileo a non pubblicizzare le proprie idee sul vuoto. In Italia infatti il dibattito sull'esistenza del vuoto rimase confinato alla corrispondenza privata di Torricelli e Ricci. Furono i francesi a raccogliere l'eredità dei discepoli di Galileo, grazie soprattutto all'opera di Marin Mersenne. Qui la questione del vuoto trovò un'accoglienza diversa, nonostante anche la Francia fosse un paese cattolico, ma dove i Gesuiti non avevano l'influenza che invece esercitavano sul dibattito scientifico italiano. L'eredità di Galileo e di Torricelli in Italia fu raccolta dall'Accademia del Cimento, fondata nel 1657 per volere del granduca Ferdinando II e del principe Leopoldo de' Medici. Riprendendo l'enfasi posta da Galileo sul ruolo delle «sensate esperienze» nelle indagini sui principî del mondo naturale, gli accademici si concentrarono soprattutto sull'attività sperimentale. In questo contesto, l'esperimento di Torricelli e le sue numerose varianti furono al centro degli incontri dell'Accademia fin dai suoi esordi, rappresentando una costante fino al 1662, quando le sedute sperimentali si fecero sempre più rare, probabilmente a seguito della decisione di pubblicare i risultati fino ad allora ottenuti in un'opera che apparve tra il 1666 e il 1667 con il titolo di *Saggi di naturali esperienze*. Come è stato più volte rilevato, se nei *Saggi* la pressione atmosferica appariva come un'ipotesi molto probabile, e l'esistenza del vuoto quasi come una sua conseguenza logica, tuttavia su entrambe le questioni si evitava accuratamente di prendere una posizione esplicita, limitandosi a descrivere gli esperimenti senza avanzare alcuna ipotesi sulle cause dei fenomeni. Tanta cautela, riflesso non solo di dissidi interni, ma della volontà del principe Leopoldo, si spiega con la posizione assunta dai Gesuiti, che nel 1650 si erano espressi ufficialmente contro il vuoto, associando i suoi sostenitori ai discepoli della filosofia empia di Democrito ed Epicuro. Se Leopoldo, pur volendo raccogliere l'eredità scientifica galileiana e rilanciare il mecenatismo della casa medicea, si guardava bene dall'aprire un altro fronte di scontro con la Chiesa cattolica, la neutralità dei *Saggi* era espressione anche di dissidi interni all'Accademia, che tra i suoi membri annoverava appassionati fautori della nuova filosofia meccanicistico–corpuscolare e difensori del vecchio sapere della tradizione aristotelica. La pressione e il vuoto furono al centro di questo conflitto.⁸¹

V. IL DIBATTITO SULL'ESPERIMENTO DI TORRICELLI IN FRANCIA E BLAISE PASCAL

Dalla *Lettera a Filaleti* di Dati sappiamo che dopo lo scambio di lettere con Ricci, Torricelli aveva provato a inserire nel tubo alcuni animali, tra cui «pesci, mosconi, e farfalle per osservarne la vita, il suono, e il volo». Dati scriveva quando esperimenti del genere erano noti in tutta Europa grazie a Robert Boyle e ai membri dell'Accademia del Cimento, ma i tentativi di Torricelli si rivelarono fallimentari poiché prima di poter osservare gli effetti del vuoto, gli animali venivano uccisi dal peso del mercurio⁸². Nello stesso periodo, François Bonneau, signore du Verdus (1620 ca.-1675), giovane discepolo del matematico e filosofo della natura Gilles Personne de Roberval (1602-1675), si trovava a Roma al seguito dell'ambasciatore francese, il marchese di Saint-Chaumont. Nicéron lo aveva interpellato per avere informazioni sull'esperimento barometrico, che pare fosse stato ripetuto in presenza del Granduca. Nella prima settimana di luglio, probabilmente tra il 2 e il 9, Ricci mostrò a du Verdus la celebre lettera dell'11 giugno. Quest'ultimo scrisse a Torricelli dichiarandosi convinto del peso dell'aria e del vuoto, salvo spiegare la sospensione del mercurio tramite l'equilibrio tra il suo peso di e la «virtù attrattiva e sostenente dell'aria»⁸³. La figura di du Verdus è importante non tanto per le sue idee sull'esperimento barometrico, quanto piuttosto per il ruolo che ebbe nel trasmettere Oltralpe la notizia dell'esperimento barometrico. Il 16 luglio infatti ricevette da Ricci le lettere «intorno alle cose del vacuo» con la precisa intenzione di inviarle a Mersenne, cosa che fece alla fine di luglio, forse con l'intermediazione di Nicéron. I documenti arrivati a Parigi erano tuttavia incompleti, dato che riportavano soltanto degli estratti che lasciavano molti punti in ombra, a cominciare dal ruolo di Torricelli nell'esperimento barometrico⁸⁴.

In ottobre Mersenne partì alla volta dell'Italia. A dicembre del 1644 era a Firenze, dove Torricelli replicò l'esperimento in sua presenza. Successivamente fu a Roma, dove incontrò Ricci, Magiotti e Maignan. Anche qui fu testimone di un esperimento, probabilmente eseguito con l'apparato sperimentale ideato da Berti. Non sembra invece abbia presenziato all'esperimento con il mercurio realizzato sempre a Roma dal cardinale Giovanni Carlo de' Medici, fratello del Granduca Ferdinando II, nel febbraio del 1645. Quando nel marzo del 1645 Mersenne lasciò la capitale, aveva con sé tutte le informazioni per continuare le ricerche sul vuoto in Francia⁸⁵. Arrivato a Parigi, cercò anzitutto di ripetere l'esperimento torricelliano. Per questo si rivolse a Pierre Chanut (1601-1662), all'epoca magistrato di Riom, il tentativo fallì a causa dei vetri troppo sottili che si rompevano sotto il peso del mercurio. Di lì a poco Chanut partì per la Svezia in qualità di ambasciatore e Mersenne si recò nella zona meridionale della Francia. Il progetto fu momentaneamente abbandonato, ma alla fine dell'estate del 1646 si presentò una nuova occasione grazie a Pierre Petit (1594-1677), ingegnere del re e intendente per le fortificazioni, che da tempo frequentava la cerchia di Mersenne. In quel periodo Petit si

recò a Dieppe per esaminare una macchina che si diceva consentisse di rimanere sott'acqua per diverse ore, addirittura di raggiungere il fondo del mare. Per strada decise di fermarsi a Rouen per fare visita alla famiglia Pascal.

Il 1646 è infatti l'anno in cui Blaise Pascal inizia a interessarsi al problema del vuoto. Oltre a essere la residenza della sua famiglia, Rouen era anche un centro rinomato per le vetrerie, ed è probabile che Mersenne avesse suggerito Petit di approfittare della circostanza per trovare l'attrezzatura adatta per eseguire l'esperimento con il mercurio. Petit concordò con i Pascal di provare al suo rientro da Dieppe, e così fecero: nell'ottobre del 1646 l'esperimento torricelliano fu realizzato per la prima volta sul suolo francese, che da quel momento in poi diventa il centro del dibattito sul vuoto. Una volta tornato a Parigi, a novembre Petit scrisse una lettera a Chanut contenente la relazione dettagliata dell'esperimento e delle circostanze in cui era stato eseguito, aggiungendo alcune riflessioni sulle implicazioni teoriche che ne aveva tratto con Pascal. Quest'ultimo sapeva che l'esperimento era stato realizzato in Italia, ma stando a quanto raccontò successivamente, ignorava chi fosse l'autore. Étienne e Blaise Pascal, insieme a Petit, replicarono l'esperienza di Torricelli con un tubo di vetro o *sarbatane* di circa 1,3 m, osservando che il mercurio si abbassava di quasi 49 cm, attestandosi a un'altezza quasi pari a quella osservata da Torricelli. Nel corso della discussione successiva all'esperimento riportata da Petit, Blaise Pascal osservò che non era affatto certo che lo spazio sopra il mercurio fosse privo di aria: «i semplici» avrebbero infatti obiettato che essa era penetrata attraverso i pori del vetro proprio per impedire la formazione del vuoto: questa era l'opinione sostenuta dalla maggioranza dei seguaci di Aristotele¹. Nel corso dell'inverno 1647 Pascal ideò e realizzò una serie di esperimenti con tubi di forme e lunghezze diverse, con l'obiettivo anzitutto di stabilire se effettivamente vi fosse quell'aria rarefatta di cui parlavano di aristotelici, che grazie a un grande potere di espansione, spingeva il mercurio verso il basso. Costatò, come aveva fatto Torricelli, che il livello rimaneva invariato anche in presenza di un vuoto maggiore². Non appena seppe dell'esperimento realizzato a Rouen, Jacques Pierius, professore di filosofia del locale *Collège de l'Archevêché*, pubblicò un opuscolo intitolato *An detur vacuum in rerum natura* (1646), nel quale sosteneva che il vuoto era in realtà pieno di vapori o esalazioni di mercurio. Pascal organizzò un esperimento spettacolare nella piazza antistante la vetreria di Rouen, al quale assistettero, oltre a Pierius, più di cinquecento persone. Si procurò due tubi lunghi più di dodici metri, fissandoli all'albero di una nave trasportato nella piazza per l'occasione. Domandò ai presenti cosa sarebbe accaduto riempiendo un tubo con acqua e l'altro con vino. I pienisti risposero che essendo più leggero, il vino avrebbe liberato più vapori rispetto all'acqua, attestandosi così a un livello inferiore. Il

¹ Cfr. *infra*, cap. III, p.

² Nel suo *Discours du vide* (1646) Pierre Guiffart descrisse alcuni degli esperimenti di Pascal e le reazioni che questi suscitarono tra i sostenitori dell'*horror vacui*, molti concordi nell'adottare l'ipotesi dell'aria rarefatta. Cfr. Pascal (1964-1992, vol. II, pp. 494-5).

risultato dimostrò l'esatto contrario, cosicché anche Pierius e i sostenitori della teoria dei vapori dovettero arrendersi all'evidenza³.

La lettera di Petit fu poi pubblicata alla fine del 1647 con il titolo *Observation touchant le vide faite pour la première fois en France*, insieme alla riproduzione della *Demonstratio ocularis* del padre cappuccino Valeriano Magni (1586-1661). Di origini milanesi, dopo essere entrato nell'ordine francescano, Magni aveva viaggiato per l'Europa, come emissario del suo patrono, il re di Svezia Sigismondo III. Dal 1646 al 1648 visse in Polonia, dove nel luglio del 1647 replicò l'esperimento con il mercurio. Nel 1642-43 Magni era stato a Roma e Firenze. Qui probabilmente aveva letto i *Discorsi* di Galileo e da convinto antiaristotelico, arrivato in Polonia aveva cercato di ripetere gli esperimenti che in quel periodo occupavano la mente dei discepoli di Galileo. Inizialmente impiegò tubi di legno e acqua, ma una volta riuscito a procurarsi l'attrezzatura adatta, realizzò un esperimento analogo a quello di Torricelli, che descrisse nella *Demonstratio ocularis*, pubblicata a Varsavia nel luglio del 1647. In quest'opera si dichiarava convinto di aver dimostrato sperimentalmente l'esistenza del vuoto, senza soffermarsi troppo sulla causa della sospensione del mercurio. A suo parere, il fatto che la luce attraversasse lo spazio al di sopra del mercurio era un chiaro indice della possibilità del moto nel vuoto, contrariamente a quanto sostenevano i peripatetici. All'epoca in Polonia viveva anche Pierre Des Noyers, segretario della regina di Polonia Ludovica Maria Gonzaga, che scrisse prima a Roberval e poi a Mersenne per informarli dell'impresa di Magni: «desidero dirvi che c'è qui un cappuccino di nome P. Valeriano Magni che ha fatto stampare una filosofia in cui dice che il vuoto può trovarsi in natura, e lo dimostra con l'esperimento che segue, che ha fatto in presenza del re e della regina»⁸⁶. Dalla Francia rispose Roberval per conto di Mersenne, con una lettera in latino, come gli aveva richiesto Des Noyers, in modo che potessero leggerla anche il re e la regina. Magni era accusato di plagio, visto che l'esperimento era stato eseguito in Italia, replicato in Francia da Petit e, come vedremo subito, approfondito in numerose varianti da Pascal⁸⁷. Nel mentre Magni aveva completato l'*Altera pars Demonstratio ocularis de possibilitate vacui*, il secondo atto della sua relazione sperimentale *de vacuo*; il 5 novembre scrisse a Roberval per difendersi, precisando di non aver mai visto né Torricelli né Ricci, di aver incontrato Mersenne mentre si trovava in Italia, ma di non aver mai discusso con lui del vuoto. Le sue ricerche sul vuoto erano quindi del tutto originali. Riconosceva la priorità di Torricelli, ma in sostanza respingeva qualsiasi accusa di plagio. Come hanno osservato diversi studiosi della storia dell'esperimento barometrico, non c'è ragione di dubitare della sincerità di Magni, anche perché quest'ultimo non condivideva l'idea che la pressione fosse la causa della sospensione del mercurio. Più tardi, accusando Magni di

³ Cfr. Humbert (1947, pp. 78-9); Shea (2003, pp. 44-46) e Pascal a Ribeyre, 12 luglio 1651, in Pascal (1998-2000, vol. I, pp. 438-47)

aver realizzato l'esperienza barometrica ripetendo in sostanza quello che aveva letto nelle sue *Expériences nouvelles*, Pascal si dimostrerà quantomeno male informato⁸⁸.

Prima pubblicazione di Pascal sul problema del vuoto, le *Expériences nouvelles touchant le vide* uscirono a Parigi nella prima metà di ottobre del 1647 per i tipi di Pierre Margat. La prima edizione, un volumetto in-8° di poco più di quaranta pagine, conteneva una lunga prefazione e un compendio delle due parti di cui si componeva un trattato sul vuoto che Pascal si riprometteva di pubblicare in futuro. La prima parte raggruppa gli esperimenti che Pascal aveva eseguito dall'autunno del 1646, quando aveva ripetuto l'esperienza torricelliana con Petit. Da allora, aveva proseguito le ricerche sul vuoto con tubi di forme e lunghezze diverse, ripetendo più volte l'esperimento di Torricelli, realizzandone uno analogo a quello di Gaspare Berti, e inventandone di nuovi, la cui originalità Pascal rivendicava con forza nella prefazione. Prima della pubblicazione delle *Expériences nouvelles*, gli esperimenti di Pascal erano state oggetto di commenti e discussioni da parte del medico Pierre Guiffart, che ne aveva descritte alcune nel *Discours du vide* riportando anche le obiezioni degli aristotelici (convinti che sopra il mercurio vi fosse aria rarefatta)⁸⁹.

Oltre a definire il proprio contributo sperimentale alla questione, Pascal stabiliva una serie di punti che, come lui stesso annunciava, avrebbero trovato pieno sviluppo in un'opera più ampia, un intero trattato dedicato al vuoto, il *Traité du vide*, di cui le *Expériences nouvelles* costituivano la sinossi. Pascal non riteneva tuttavia di possedere ancora una prova definitiva dell'esistenza del vuoto, che più tardi affermò di aver ottenuto solamente dall'esperimento del Puy-de-Dôme del 1648. L'opera è importante per comprendere non solo l'evoluzione della posizione di Pascal sull'*horror vacui*, ma anche la rivendicazione dell'originalità del proprio contributo sperimentale. D'altra parte, sebbene Pascal mostrasse di conoscere che l'esperimento sul vuoto era stato originariamente realizzato in Italia, egli non citava esplicitamente Torricelli, circostanza intorno a cui si accese il dibattito sulla buona fede di Pascal nel passare sotto silenzio un nome che in Francia era associato all'esperienza dell'argento vivo, come dimostra la lettera di Petit a Chanut. Buona fede che Mathieu aveva esplicitamente negato⁹⁰. Del resto, è appena il caso di notare che nelle *Expériences* Pascal non associava nemmeno il nome di Galileo alla scoperta del limite di sollevamento delle acque, cosa che invece farà nei *Traités de l'équilibre des liquors* pubblicati postumi nel 1663⁹¹.

Le *Expériences Nouvelles* offrono quindi un quadro di quella che può essere considerata la prima fase delle ricerche di Pascal sul vuoto, dalla replica dell'esperimento di Torricelli. L'opera è importante in quanto rappresenta la sintesi provvisoria che Pascal volle presentare riguardo a una questione su cui aveva già una posizione ben definita, ma riteneva opportuno non fare affermazioni perentorie. Questo perché le obiezioni sollevate dall'aristotelico Jacques Pierus e Descartes, di cui troviamo traccia nel testo (anche se Pascal non lo nomina esplicitamente), avevano un loro peso davanti alla mancanza di una

prova definitiva dell'esistenza del vuoto⁹² Descartes, probabilmente durante le due visite che fece a Pascal a Parigi il 23 e il 24 settembre 1647 – Pascal si era infatti trasferito nella capitale in estate –, aveva spiegato che di sopra del mercurio doveva esserci quella materia sottile che trasmetteva la luce e riempiva i pori di ogni corpo. I due avevano infatti discusso del vuoto, in particolare di un esperimento che Pascal aveva eseguito con una siringa – probabilmente uno di quelli riportati nelle *Expériences*. Quando aveva domandato a Descartes «cosa credesse che fosse entrato nella siringa, rispose che c'era la sua materia sottile». Inoltre, nel corso di quegli incontri, come confidò a Mersenne il 13 dicembre di quell'anno, Descartes doveva aver suggerito a Pascal di «sperimentare se l'argento vivo salisse alla stessa altezza quando si è in cima a una montagna e quando si è a valle», offrendogli così uno spunto per realizzare nel 1648 il celebre esperimento del Puy-de-Dôme. Se di debito si trattò, Pascal non lo riconobbe nemmeno questa volta. L'unica testimonianza dell'incontro tra Descartes e Pascal è la lettera che la sorella Jacqueline inviò all'altra sorella, Gilberte, il 25 settembre 1647.⁹³

Questo genere di obiezioni, e la mancanza di una prova certa del vuoto, avevano indotto Pascal alla cautela. Nelle *Expériences* parlava di «vuoto apparente», ossia di uno spazio privo di materia percepibile dai sensi, salvo poi trasferire sui pienisti l'onere della prova, affermando che avrebbe continuato a sostenere che il vuoto era realmente tale «fino a quando non mi sarà mostrata l'esistenza di quella materia che lo riempie». Oltre a otto esperimenti condotti con sifoni di varia natura, tutti tesi a dimostrare l'esistenza del vuoto, senza alcun accenno alla pressione, il breve trattato comprendeva una prima serie di sette massime relative al «vuoto apparente», otto proposizioni concernenti i diversi tipi di materia che secondo i pienisti riempivano lo spazio vuoto, una seconda batteria di massime in cui Pascal esplicitava le sue conclusioni, e infine le possibili obiezioni contro queste tesi. La dimostrazione dell'esistenza del vuoto sembrava essere lo scopo principale degli esperimenti, ma le *Expériences* conservavano comunque l'idea che in natura fosse presente una resistenza alla formazione di spazi vuoti. Tale forza era tuttavia limitata, pari a quella «con cui l'acqua a una certa altezza, che è circa di trentuno piedi, tende a cadere verso il basso»⁹⁴. Le proposizioni riguardavano invece la natura dello spazio apparente vuoto. Pascal riportava le obiezioni degli aristotelici, di Pierius e Descartes. Anticipava inoltre la tesi del gesuita Étienne Noël (1581-1619), che di lì a breve con le sue lettere darà modo a Pascal non solo di precisare la sua posizione sul vuoto, ma di consegnare alla storia della scienza e della filosofia una vera e propria lezione di metodo. All'epoca Étienne Noël era rettore del collegio gesuita di Clermont a Parigi. Sembra fosse stato uno dei maestri di Descartes a La Flèche, rimanendo poi in contatto con il filosofo e subendone anche l'influenza, che infatti pare manifestarsi nell'interpretazione che diede dell'esperimento barometrico nella prima delle lettere a Pascal. Praticamente subito dopo l'uscita delle *Expériences*, tra il 20 e il 25 ottobre 1627, dopo aver ricevuto il libro e averlo letto attentamente, scrisse una lunga lettera a Pascal in cui formulava una serie di

obiezioni. In sintesi, secondo Nöel la sommità del tubo era piena di aria rarefatta entrata attraverso i pori del vetro. La sua interpretazione era la commistione tra elementi di derivazione aristotelica e suggestioni cartesiane. Pur senza nominarli, Aristotele e Descartes erano le due autorità a cui Nöel si appellava per dimostrare che il vuoto era un'assurdità sia dal punto di vista fisico che logico. Il fondamento delle sue obiezioni era la natura dell'atmosfera, concepita aristotelicamente come un miscuglio dei quattro elementi. L'aria era quella parte dell'atmosfera che, una volta separata dal resto da qualche forza o violenza, diventava così rarefatta da penetrare i pori dei corpi più compatti come il vetro. Era quindi la forza necessaria a scomporre l'atmosfera nei suoi componenti elementari ad essere la vera causa della sospensione del mercurio. Che il vetro fosse permeabile alla parte più rarefatta dell'atmosfera era indirettamente dimostrato dal fatto che la luce poteva attraversarlo, così come facevano quei corpi finissimi che era possibile intravedere nel fascio di luce proiettato dal prisma. Nel caso specifico dell'esperimento torricelliano, la causa che separava l'aria dagli altri componenti dell'atmosfera era la gravità del mercurio. In virtù del suo peso, il mercurio, scendendo, trascinava con sé l'aria contigua ai pori del vetro. A sua volta, questa parte di aria si portava appresso quella contigua, che attraversava i pori del vetro, esattamente come accadeva filtrando un liquido. Una volta entrata nel tubo, quest'aria si dilatava violentemente per occupare tutto lo spazio che altrimenti sarebbe rimasto vuoto. In natura esisteva dunque un orrore per il vuoto, che secondo Nöel era empiricamente verificabile. Dal punto di vista logico, era il concetto di spazio o estensione che, seguendo Descartes, il gesuita identificava con la materia, a rendere il vuoto una nozione intimamente contraddittoria. Vi erano infine i fenomeni associati alla luce, che dimostravano inequivocabilmente che il vuoto non poteva esistere.

La risposta di Pascal non si fece attendere: il 29 ottobre scrisse a Nöel una lunga lettera che si apriva con l'enunciazione della «regola universale che si applica a tutti i soggetti particolari quando si tratta di riconoscere la verità». Questa regola stabiliva che una proposizione per essere considerata certa o vera doveva soddisfare uno di questi due requisiti: appartenere alla categoria degli assiomi o principi auto-evidenti ai sensi o alla ragione, a seconda della natura dell'argomento, oppure essere ottenuta attraverso una catena di deduzioni necessarie da quei principi. Esaminate alla luce di questa regola, le affermazioni di Nöel si rivelavano del tutto infondate. Per esempio, quando affermava che lo spazio sopra il mercurio doveva essere pieno di qualche materia poiché la luce vi passava attraverso con «rifrazioni e riflessioni», Pascal rispondeva che l'unica rifrazione subita dalla luce di cui si potesse essere certi era quella causata dal vetro. Al di là dei singoli argomenti addotti da Nöel, ciò che a Pascal premeva sottolineare era la vanità della pretesa di definire esattamente la natura dello spazio, della luce e del movimento, nozioni su cui ancora regnava l'incertezza. Al contrario, l'esperimento torricelliano e le varianti che aveva ideato dimostravano indubitabilmente l'esistenza di uno spazio vuoto,

o almeno privo di qualsiasi materia nota alla ragione o ai sensi. Allo stesso modo, le affermazioni di Noël sulla natura dell'aria erano del tutto gratuite, e nemmeno esistevano prove dell'esistenza della materia sottile. Anzi, erano più i motivi che portavano a negarla che quelli a suo favore. Il problema era che invece di riflettere sull'evidenza sperimentale, il gesuita seguiva il principio di autorità, che aveva un peso nelle «materie storiche» – e ovviamente in ambito religioso, dove Pascal rinviava alla sottomissione all'autorità dei misteri della fede rivelati dallo Spirito Santo –, ma non in filosofia naturale. La via per giudicare un'ipotesi passava per la dimostrazione per assurdo, il procedimento più sicuro per accertare se essa fosse da annoverare tra quelle vere, false o dubbie. Questo perché da una stessa causa possono derivare effetti diversi, e uno stesso effetto può essere prodotto da cause diverse. Non essendovi corrispondenza biunivoca tra causa ed effetto, la dimostrazione per assurdo era l'unica via attraverso cui gli esseri umani potevano avere accesso alla verità⁹⁵.

Nel seguito della lettera Pascal rifiutava l'identificazione di materia ed estensione. Certamente, osservava, un corpo è esteso in quanto occupa uno spazio, ma ciò è diverso dall'identificarlo con esso. Come un corpo, anche lo spazio ha larghezza, lunghezza e profondità, con la differenza che il primo è mobile, mentre il secondo è immobile, che il primo non può accogliere un altro corpo, mentre il secondo sì. Ciò è comprensibile facendo astrazione dalla materia, e considerando il concetto di spazio vuoto sotto la nozione di solido geometrico. La massima per cui la penetrazione delle dimensioni è impossibile valeva infatti soltanto per i corpi materiali, e non per i solidi geometrici. Il vuoto era quindi affatto diverso dal nulla o dal non-ente su cui gli aristotelici, a partire dal Maestro, avevano fatto leva per dimostrarne l'impossibilità. Sgombrato il campo anche dall'argomento fondato sull'impossibilità della penetrazione delle dimensioni, Pascal poteva concludere «che c'è tanta differenza tra il nulla e lo spazio vuoto quanta ve n'è tra lo spazio vuoto e il corpo materiale; [...] dunque lo spazio vuoto occupa il posto medio tra la materia e il nulla»⁹⁶.

La polemica con Noël non terminò qui: agli inizi di novembre il gesuita scrisse una lunga lettera di risposta in cui, pur rinunciando ad alcune delle concezioni aristoteliche esposte nella prima missiva, ribadiva l'impossibilità del vuoto e la sua ipotesi dell'aria rarefatta. Soprattutto, non comprendeva la definizione pascaliana di spazio vuoto. Qual era, domandava, il significato della nozione di un vuoto che non si identificava né con Dio né con le creature? Inoltre, com'era possibile che la luce si trasmettesse dove non c'era un corpo che potesse fungere da veicolo?⁹⁷. Alla fine di gennaio del 1648, Noël pubblicò *Le Plein du Vide*, in cui, salvo alcune modificazioni, ribadiva quanto aveva scritto a Pascal⁹⁸. Intanto Pascal aveva già scritto la sua risposta alla lettera di Noël, indirizzata al matematico e filosofo Jacques Le Pailleur. Dopo l'uscita del libro di Noël, rielaborò la lettera e la inviò a febbraio del 1648. La polemica ebbe un ulteriore strascico con una lettera del padre di Pascal, Étienne, a Noël, dell'aprile dello stesso anno,

dopodiché, con la pubblicazione dell'edizione latina dell'opera del gesuita, Pascal considerò chiusa la partita⁹⁹.

Tra i lettori delle *Expériences nouvelles* vi fu naturalmente anche Descartes. Il suo pensiero è documentato lettera che inviò a Mersenne il 13 dicembre 1647, nella quale si lamentava di non essere stato informato prima degli esperimenti descritti nel libro, che aveva ricevuto l'8 dicembre dal «M. de Zuylichem», ossia dal padre di Christiaan Huygens, Constantijn. Come abbiamo accennato, riconosceva che Pascal si era impegnato nella confutazione della materia sottile, e ricordava di aver suggerito a Pascal di «sperimentare se l'argento vivo salisse alla stessa altezza quando si è in cima a una montagna e quando si è a valle». Inoltre, aveva ideato una scala graduata «per poter sapere anche se il cambiamento di tempi e luoghi non influisca», «una misura di carta di due piedi e mezzo» che aveva gentilmente allegato alla lettera a Mersenne¹⁰⁰. Ma Descartes non si fermava qui: suggeriva di inserire nel vuoto torricelliano «un po' di zolfo e canfora», per poi provocarne la combustione con una lente ustoria, per osservare così se il fuoco salisse verso l'alto e di che aspetto fosse la fiamma. Questo esperimento era evidentemente concepito per confutare definitivamente la teoria aristotelica della leggerezza positiva, esattamente come più tardi faranno i membri dell'Accademia del Cimento¹⁰¹.

Dopo aver ricevuto la missiva di Descartes, Mersenne scrisse a Constantijn Huygens e al matematico Jacques-Alexandre Le Tenneur. A Huygens chiedeva informazioni sul prezzo del mercurio in Olanda, lasciando intendere che si stava occupando dei preparativi per condurre un esperimento su una montagna «per vedere se il vuoto sarà maggiore o minore che qui» e «per conoscere la causa di questo vuoto»¹⁰². A Le Tenneur sembra invece avesse chiesto di ripetere l'esperimento barometrico sul Puy-de-Dôme. Di tali questioni Mersenne si era occupato nelle *Reflexiones Physico-Mathematicae* pubblicate nell'ottobre 1647, dove rilevava le differenze tra le misurazioni compiute a Firenze e a Parigi e proponeva di ripetere l'esperimento barometrico a diverse altezze lungo il corso di un fiume. Aveva inoltre parlato dell'ipotesi del cilindro d'aria che sosteneva il mercurio nella colonnina. Nella risposta Le Tenneur affermava di non comprendere questa ipotesi, e lo informava di non essere nelle condizioni di ripetere l'esperimento sulla sommità della montagna, se non altro perché ormai non si trovava più in Alvernia, ma a Tours. In ogni caso riteneva, citando Roberval, che l'esperimento sarebbe stato del tutto inutile, poiché era convinto che sia in cima sia ai piedi di un'altura, il risultato sarebbe stato il medesimo. Opinione, questa, che in effetti Roberval sosterrà più tardi nella sua seconda *Narratio* sul vuoto inviata a Desnoyers, salvo poi aggiungere una sezione in cui riporterà i risultati dell'esperimento di Pascal¹⁰³. Mersenne quindi sembrava essere consapevole che il risultato dell'esperimento barometrico compiuto a diverse altitudini avrebbe fatto luce sulla causa della sospensione del mercurio e *ipso facto* su quella del vuoto.

Siamo così arrivati a gennaio del 1648: all'epoca Pascal aveva già scritto al cognato Florin Pèrier la celebre e controversa lettera in cui gli domandava di eseguire l'esperimento torricelliano sulla cima del Puy de Dôme, un vulcano spento alto 1.464 m situato nell'omonimo dipartimento nell'attuale regione Auvergne-Rhône-Alpes¹⁰⁴. Al di là della disputa sorta intorno a questo documento, e delle rivendicazioni di priorità espresse successivamente da Descartes in due lettere a Carcavy¹⁰⁵, qui è importante sottolineare che Pascal fu effettivamente il primo a sostenere che l'esperimento offriva la prova definitiva dell'ipotesi della pressione e la confutazione altrettanto decisiva della dottrina dell'*horror vacui*. Tra la lettera di Pascal e l'effettiva realizzazione dell'esperimento passò quasi un anno, per la precisione poco più di dieci mesi. Pèrier salì sul Puy de Dôme il 19 settembre 1648, constatando che il mercurio in cima alla montagna si attestava a un livello inferiore rispetto a quello registrato presso il convento dei Minimi di Clermont. Poco tempo dopo, agli inizi di ottobre, Pascal ripeté l'esperimento sulla Torre Saint-Jacques a Parigi, e nello stesso mese pubblicò la *Recit de la grande expérience des liqueurs*. L'opera conteneva la lettera che aveva inviato a Pèrier l'anno precedente, la relazione di quest'ultimo dell'esperimento e alcune considerazioni di Pascal su cui è utile soffermarsi brevemente.

Come abbiamo osservato precedentemente, nelle *Expériences Nouvelles* Pascal non accenna mai all'ipotesi della pressione: l'unica sua preoccupazione sembra essere la dimostrazione sperimentale dell'esistenza del vuoto. Continuava comunque a sostenere, almeno apparentemente, l'idea che in natura vi fosse una resistenza alla formazione del vuoto. Come spiega nella lettera a Pèrier, nelle *Expériences* aveva confutato la tesi dell'impossibilità assoluta del vuoto, ma non avendo a disposizione un'esperienza capace di chiarire una volta per tutte la causa della formazione del vuoto, continuò a sostenere l'idea che la natura avesse orrore del vuoto, ma che grazie all'applicazione di una certa forza fosse possibile ottenerlo. Il «grande esperimento dei fluidi» lo aveva definitivamente convinto che tutti gli effetti precedentemente attribuiti all'orrore della natura per il vuoto erano invece «casi particolari dei una proposizione universale sull'equilibrio dei fluidi», ossia erano da attribuire al peso e alla pressione dell'aria. Prima ancora dell'esperimento del Puy de Dôme, un'altra esperienza aveva contribuito a rafforzare l'ipotesi del peso e della pressione, ma non era bastata a fargli abbandonare definitivamente l'*horror vacui*. Si tratta di un altro celebre esperimento, il cosiddetto «esperimento del vuoto nel vuoto», che consiste appunto nel creare il vuoto all'interno di un altro vuoto, ponendo due tubi l'uno dentro l'altro. Pascal riferiva di averlo realizzato in presenza di Pèrier alcuni giorni prima. Come nel caso dell'esperimento sulla montagna, anche per il vuoto nel vuoto furono sollevate questioni di priorità, dato che nel 1651 Pecquet ne attribuì l'invenzione ad Adrien Auzout (o Auzout, 1622-1691). Tuttavia, nella *Gravitas comparata, seu comparatio gravitatis aeris cum hydrargi gravitate* (1648)

Étienne Noël descrive due versioni certamente più antiche dell'esperimento, una di Pascal e una di Roberval¹⁰⁶.

Pascal notava infatti che gli effetti del vuoto nel vuoto – ossia la mancata sospensione del mercurio – potevano anche essere riferiti all'orrore della natura per il vuoto. Anche se non spiega questa affermazione, tuttavia si può ipotizzare che il vuoto nel vuoto non offriva una prova per così dire diretta dell'effetto del peso e della pressione, ma sottolineava gli effetti che seguivano dalla loro assenza. Invece, l'esperimento condotto a un'altezza maggiore rispetto alla solita era davvero risolutivo:

Se risulta che il livello del mercurio in cima è inferiore rispetto ai piedi della montagna [...], ne seguirà necessariamente che il peso e la pressione costituiscono l'unica causa di questa sospensione dell'argento vivo, e non l'orrore per il vuoto, poiché è indubitabile che vi è molta più aria che pesa sui piedi della montagna, che non sulla sua sommità; mentre non si potrebbe dire che la Natura aborre il vuoto più ai piedi della montagna che sulla sua sommità.

E in effetti le previsioni di Pascal furono confermate nei minimi dettagli da Périer. Mersenne non fece in tempo a essere testimone del successo dell'esperimento, dato che si spense il primo settembre 1648. Nell'estate di quell'anno aveva pubblicato il *Liber novus praelusorius*, in cui aveva descritto l'esperienza del vuoto nel vuoto. Soprattutto, durante il suo ultimo anno di vita Mersenne era stato il punto di riferimento della discussione su un altro importantissimo esperimento. Esso consisteva nel porre nel vuoto torricelliano una vescica di carpa sgonfia e ben legata; quando il mercurio scendeva, la vescica si gonfiava. Nel 1651 Pecquet ne aveva attribuito l'invenzione a Roberval, che infatti la descrive nella seconda *Narratio* sul vuoto inviata da Desnoyers, attribuendone la causa alla presenza di aria rarefatta¹⁰⁷. Dello stesso parere era anche Mersenne, che riteneva che tale esperimento fosse alquanto problematico per i vacuisti, come scrisse a Huygens padre il 17 aprile 1648. Parlando di Pascal e del suo «libro sul vuoto» – evidentemente il trattato annunciato nelle *Expériences*, di cui rimane soltanto la prefazione –, Mersenne affermò: «qui cominciamo a credere che non sia vuoto a causa di una vescica appiattita e completamente priva di aria che, posta in questo vuoto, si gonfia immediatamente»¹⁰⁸. Secondo Christiaan Huygens, nella vescica era presente un residuo di aria che si espandeva «per soccorrere la natura in questo vuoto, o quasi, che c'è nel tubo»¹⁰⁹. Quell'anno si era espresso anche Thomas Hobbes sul vuoto, che aveva scritto due volte a Mersenne. La prima lettera, del 17 febbraio 1648, conteneva la negazione categorica del vuoto assoluto, e la seconda, del 25 maggio, concludeva che, nonostante gli esperimenti, non si poteva affermare l'esistenza del vuoto: «Tutte le esperienze fatte da voi e da altri con l'argento vivo, non concludono che vi sia il vuoto, perché la materia sottile che vi è nell'aria, essendo compressa, passerà attraverso l'argento vivo»¹¹⁰.

Insomma, Mersenne era morto nel dubbio, mentre Descartes e altri pienisti di orientamento meccanicista come Hobbes erano fermamente convinti dell'impossibilità fisica del vuoto. Il 1649 aveva visto la realizzazione di altri esperimenti sul Puy de Dôme: a maggio Pascal aveva raggiunto Périer a Clermont, ed era salito sulla montagna con un pallone parzialmente gonfio, osservando che il suo volume aumentava al crescere dell'altezza¹¹¹. A luglio Gassendi aveva pubblicato le *Animadversiones*, in cui riferiva delle esperienze di Pascal a Rouen e sul Puy de Dôme, dopo averle apprese da Auzout¹¹². Ad ottobre Descartes era arrivato a Stoccolma su invito di Cristina di Svezia; qui aveva iniziato a realizzare alcuni esperimenti sul vuoto con Chanut, ma, com'è noto, si era spento l'11 febbraio del 1650. La primavera dell'anno successivo Pascal lavorò a quel *Traité du vuide* che aveva annunciato nelle *Expériences Nouvelles*, senza tuttavia portarlo mai a compimento: di esso rimangono la prefazione e alcuni frammenti. Nella prefazione si lanciava in un'appassionata difesa dell'esistenza del vuoto contro coloro che invocavano l'autorità degli antichi per sostenere l'opinione contraria. In realtà, spiegava

quando gli Antichi hanno assicurato che la natura non sopportava affatto il vuoto, hanno inteso dire che essa non lo sopportava affatto in tutti gli esperimenti che avevano visto; ed essi non avrebbero potuto senza temerarietà includervi quelli che non erano da loro conosciuti. Che se lo fossero stati, senza dubbio essi avrebbero dedotto le nostre stesse conseguenze, e li avrebbero, secondo il loro parere, legittimati di quell'Antichità di cui si vuole fare oggi l'unico principio delle scienze¹¹³.

A giugno fu costretto a difendersi dalle accuse di un gesuita del collegio di Montferrand, padre Jean- Paul Médaille, il quale, discutendo una tesi sul vuoto dedicata a M. de Ribeyre, primo presidente della *Cour des Aides* di Clermont-Ferrand, aveva accusato Pascal di essersi attribuito indebitamente l'invenzione di Torricelli. Pascal si difese con una lettera pubblicata nel 1651, in cui ricostruiva la diffusione dell'esperimento torricelliano in Francia, accusava di plagio Valeriano Magni, molto probabilmente ingiustamente, e rivendicava con forza l'invenzione dell'esperimento del Puy de Dôme¹¹⁴. Infine, nel 1654 Pascal terminò i *Traités de l'équilibre des liqueurs et de la pensateur de l'air*, che saranno pubblicati postumi da Périer nel 1663. Con questi due trattati la controversia sul vuoto sembra chiudersi definitivamente. Gli esperimenti riportati nelle *Expériences nouvelles* che dimostravano l'esistenza del vuoto e la conferma dell'ipotesi della pressione atmosferica ottenuta con l'esperimento del Puy de Dôme trovano il loro coronamento in quella «proposizione universale sull'equilibrio dei fluidi» di cui aveva parlato nella *Récit*. Com'è stato osservato da più parti, i *Traités* segnano la nascita dell'idrostatica moderna: in essi il problema del vuoto viene inserito nel contesto generale della teoria sull'equilibrio dei fluidi, dove con quest'ultimo termine si intendono sia i liquidi sia l'aria. In altre parole, la *vexata quaestio* della pressione diventa un caso particolare dell'equilibrio dei fluidi: riducendo agli stessi principî fenomeni idrostatici e

pneumatici – in un fluido incompressibile in equilibrio la pressione si trasmette uniformemente in tutte le direzioni –, Pascal portava a compimento il lavoro iniziato da Stevin. È probabile che il principio fondamentale dell'idrostatica non fosse esattamente ciò che Pascal si proponeva di dimostrare nei *Traité*s: esso giunse come conseguenza del suo sforzo di dimostrare gli effetti del peso dell'aria. Il punto di partenza era però il principio dell'equilibrio dei liquidi, secondo cui la pressione che esercitano è proporzionale alle loro altezze¹¹⁵. Questo principio spiegava perché il mercurio nell'esperimento torricelliano si attestasse sempre alla medesima altezza. Il secondo principio fondamentale dei *Traité*s è quello relativo all'uso della pressa idraulica, secondo cui una pompa è in grado di sollevare un liquido fino a una certa altezza e non oltre, limite che dipende dall'altitudine e quindi dalla variazione della pressione atmosferica. Pascal non inventava nulla, ma dava una forma sistematica a verità che prima di lui altri avevano scoperto, ma che non erano stati in grado di metter in rapporto¹¹⁶. Per quanto attiene al *Trattato sulla pesantezza della massa dell'aria*, qui Pascal riportava una serie di esperimenti per dimostrare che l'aria ha un peso e che grazie a esso esercita una pressione sui corpi immersi in essa. Questa sembrava essere la pietra tombale posta sulla teoria dell'*horror vacui*: tutti i fenomeni fino ad allora attribuiti all'orrore della natura per il vuoto erano causati dal peso della massa dell'aria. Una verità che Pascal si preoccupava di dimostrare dettagliatamente, riprendendo tutti quei fenomeni di cui siamo occupati in precedenza: le difficoltà incontrate nell'azionare un mantice tappato e nel separare due corpi perfettamente lisci, il sollevamento dell'acqua nei sifoni e nelle pompe, la sospensione dei liquidi nei sifoni, i fenomeni associati alle ventose e alle coppette dei medici, etc., tutti erano effetti della pressione che l'aria esercita in virtù del suo peso.

VI. L'ESPERIMENTO DI TORRICELLI IN INGHILTERRA. ROBERT BOYLE E L'*AIR-PUMP*.

All'inizio del 1664, durante una delle sedute settimanali della Royal Society, Robert Boyle informò l'assemblea della recente pubblicazione dei due *Traité*s *de l'équilibre des liqueurs et de la pensateur de l'air*. Qualche mese dopo presentò una sua relazione sul libro, nella quale raccomandava di ripetere alcuni degli esperimenti di Pascal¹¹⁷. All'epoca Boyle era ormai una vera e propria autorità in materia. Erano infatti diversi anni che si occupava dell'esperimento torricelliano, del vuoto e delle proprietà fisico-chimiche dell'aria. Di lì a poco, su richiesta della Royal Society, pubblicherà anche un trattato sperimentale sui «paradossi» dell'idrostatica, dedicato in particolare all'esame degli effetti della pressione nei liquidi, nel quale dimostrava che «nell'acqua, e in altri fluidi, le parti inferiori sono premute dalle superiori»¹¹⁸.

In Inghilterra si discuteva dell'esperimento torricelliano già da diverso tempo, all'interno del circolo di Hartlib, di cui Boyle faceva parte, e nelle riunioni scientifiche informali al Gresham College di Londra, che nel 1645 videro la partecipazione dei maggiori filosofi, matematici e medici inglesi del tempo, futuri membri fondatori della Royal Society. Degli incontri del Gresham abbiamo notizia dall'autobiografia del matematico John Wallis (1616-1703), che diversi anni dopo ricordò come nel 1645, quando a causa della Guerra Civile «gli studi accademici subivano molte interruzioni in entrambe le nostre università», a Londra vi erano «diverse persone rispettabili, che si interessavano di filosofia naturale e di altre parti dello scibile umano; e in particolare di quella che è stata chiamata *Nuova Filosofia (New Philosophy)* o *Filosofia Sperimentale (Experimental Philosophy)*». Data la situazione dell'Inghilterra, durante le riunioni erano state bandite le discussioni sulle «questioni di Teologia e Affari di Stato», per occuparsi unicamente di filosofia naturale e di esperimenti, in particolare «tali da interessare *medicina, anatomia, geometria, astronomia, navigazione, statica, magnetismo, chimica, meccanica, ed esperimenti naturali*»;

Lì discutevamo della circolazione del sangue, delle valvole nelle vene, dei vasi linfatici e delle vene latte, dell'ipotesi copernicana, della natura delle comete, delle nuove stelle, dei satelliti di Giove, della forma ovale (così come appariva allora) di Saturno, delle macchie solari, delle diverse fasi di Venere e Mercurio, del miglioramento dei telescopi e della molatura delle lenti per questo scopo, del peso dell'aria, della possibilità o impossibilità del vuoto, dell'orrore che la natura prova per esso; dell'esperimento torricelliano con il mercurio, della caduta dei gravi, e del grado di accelerazione in essi; e di diverse altre cose di natura simile. Alcune delle quali allora erano state appena scoperte, e altre non così conosciute e accettate come lo sono adesso; con altre cose che appartengono a quella che è stata chiamata *La Nuova Filosofia*; che, dall'epoca di *Galileo a Firenze*, e di *Sir Francis Bacon (Lord Verulamio)* in *Inghilterra*, è stata tanto coltivata in *Italia, Francia, Germania*, e in altre parti straniere, così come qui da noi in *Inghilterra*¹¹⁹.

Tra i partecipanti, molti dei quali quindici anni più tardi daranno vita alla Royal Society, vi era infatti uno dei corrispondenti di Mersenne, Theodore Haak (1605-1690), un matematico tedesco originario del Palatinato che aveva studiato a Oxford e Cambridge. Haak era anche uno dei membri del cosiddetto «circolo di Hartlib», il sodalizio di filosofi naturali, medici, matematici e virtuosi che si raccoglieva intorno a Samuel Hartlib (1600 ca.–1662)¹²⁰. Fu probabilmente Haak a introdurre l'esperimento torricelliano presso gli inglesi, sfruttando le informazioni che Mersenne gli inviava sui tentativi allora in corso di ripeterlo in Francia. Nel 1648 Haak e altri «uomini di lettere e di rango» non solo erano riusciti a realizzarlo anche in Inghilterra, ma cercavano, per ora senza successo, di eseguire anche quello del vuoto nel vuoto.¹²¹

L'espressione «filosofia sperimentale» (*experimental philosophy*) compare già nelle *Ephemerides* di Hartlib del 1635; essa rappresenta probabilmente l'eredità della distinzione baconiana tra *scientia speculativa* e *scientia operativa*. Tuttavia, la separazione/opposizione esplicita tra filosofia naturale sperimentale da un lato e speculativa dall'altro compare nella prima metà degli anni Sessanta del XVII secolo, in particolare nei lavori di Boyle, Henry Power e Robert Hooke¹²². All'epoca essa non riguardò solamente il confronto tra vecchia e nuova filosofia, scolastica aristotelica e meccanicismo, ma operò all'interno della stessa filosofia meccanicista. Da un lato vi era chi, con Descartes, privilegiava gli aspetti sistematici del filosofare, muovendo dai principî primi per dedurre i fenomeni particolari. Dall'altro coloro che, pur condividendo gli assunti di fondo del meccanicismo, tuttavia erano convinti di dover procedere per gradi nella formulazione dei principî, attraverso esperienze escogitate appositamente per confermare o smentire una certa ipotesi.

Per molti versi, Hartlib può essere considerato come l'omologo di Mersenne, poiché si adoperò per favorire la comunicazione tra uomini di scienza di tutta Europa. Haak era al corrente dei tentativi di Mersenne di ripetere l'esperimento torricelliano. Nella primavera-estate del 1648 lo aveva ringraziato per «i vostri esperimenti con i tubi e l'argento vivo», informandolo che in Inghilterra erano in corso tentativi di ripeterli, sebbene nessuno volesse ancora pronunciarsi sull'esistenza di un «vero vuoto»¹²³. Dal 1647 anche Boyle partecipava alle attività del circolo di Hartlib, dalla tenuta di Stalbridge on Dorset dove allora risiedeva. Fu in questo periodo che probabilmente sentì parlare per la prima volta dell'esperimento di Torricelli e delle sue varianti, come attesta una lettera arrivata da Parigi e indirizzata a William Petty. Il mittente non era Mersenne, ma Charles Cavendish, fratello del duca di Newcastle William Cavendish, animatori del cosiddetto «circolo di Newcastle» che tra i suoi membri annoverava Thomas Hobbes, William Petty e Sir Kenelm Digby, tre delle figure più importanti della filosofia naturale inglese della metà del Seicento. I membri del circolo di Newcastle erano naturalmente in contatto con Mersenne, con Pierre Gassendi e con Descartes: essi agirono da tramite per la diffusione in Inghilterra non solo degli esperimenti sul vuoto, ma anche della nuova filosofia meccanicista che di lì a poco troverà proprio in Boyle uno dei suoi principali sostenitori¹²⁴.

William Petty (1623-87) rappresentava il prototipo del filosofo baconiano ed era sicuramente la più brillante delle nuove leve reclutate da Hartlib. Di origini umili – era figlio di un sarto –, in breve tempo egli diventò una figura di tutto rispetto del panorama filosofico e scientifico inglese. dal 1646 egli collaborò con Hartlib ai progetti di riforma per estendere l'istruzione agli strati più umili della popolazione e creare così una classe di artigiani e tecnici in grado di contribuire al progresso economico della nazione e all'avanzamento della conoscenza, in particolare attraverso la progettazione e la costruzione di nuovi e più precisi strumenti scientifici. Infine, nel 1649 lasciò Londra per

Oxford, dove contribuì a fondare il cosiddetto «Club Sperimentale di Oxford» (*Oxford Experimental Club*). Tornato in Inghilterra, Petty portò con sé gli insegnamenti dei filosofi meccanicisti, che elaborò in una propria versione del meccanicismo combinando in maniera piuttosto eclettica elementi dei sistemi di Gassendi, di Descartes, di Hobbes e perfino del magnetismo di William Gilbert¹²⁵. Egli fu l'ambasciatore della filosofia meccanicista nel circolo di Hartlib, introducendo i suoi membri, Boyle compreso, alle questioni allora oggetto di dibattito, come emerge dal contenuto della sua corrispondenza con Charles Cavendish. Nel maggio del 1648 Hartlib inviò a Boyle l'estratto di una delle lettere di Cavendish a Petty, in cui vi erano sia giudizi lusinghieri sulle abilità di quest'ultimo – Hobbes, per esempio, lo ringraziava per le «nuove scoperte anatomiche, e le ricerche su altre utili e ingegnose conoscenze» –, sia informazioni sulle novità filosofiche francesi. Boyle apprese così dell'imminente pubblicazione del *Philosophiae Epicuri Syntagma* di Gassendi¹²⁶ e dell'esperimento recentemente eseguito da Gilles Personne de Roberval (1602-1675). Com'è noto, nel 1647 Roberval si cimentò in una variante dell'esperimento di Torricelli, mettendo in cima al tubo la vescica sgonfia di una carpa chiusa con un legaccio; quando il mercurio scendeva, la vescica si gonfiava a causa dell'espansione dell'aria rimasta al suo interno, mentre al di fuori si formava il vuoto. Infatti, Cavendish affermava, «l'esperimento mostra come ci sia o possa esserci un vuoto»¹²⁷.

Al di fuori della cerchia di Hartlib era stato Henry Power (1623-68) a compiere i primi esperimenti sulla pressione dell'aria. Nel maggio del 1653 Power aveva eseguito diverse esperienze con l'apparato torricelliano: su una collina vicino ad Halifax aveva replicato l'esperimento del Puy-de-Dôme, pubblicando i risultati circa dieci anni più tardi nella sua *Experimental Philosophy. In Three Books* (1664). Nel 1654 Walter Charleton, seguace dell'atomismo di Pierre Gassendi, aveva descritto per la prima volta al pubblico inglese l'esperimento di Torricelli nella *Physiologia Epicuro-Gassendo Charltoniana* (1654), connettendolo esplicitamente alla disputa sull'esistenza del vuoto che opponeva gassendisti e cartesiani; anche per lui l'aria era un corpo formato da particelle elastiche, mentre l'esperienza barometrica deponeva decisamente a favore di «un *Vacuum Disseminatum* tra le particelle invisibili dell'aria e dell'acqua»¹²⁸.

L'interesse di Boyle per la questione della gravità dei fluidi risaliva agli esordi della sua carriera scientifica. Nel 1647, leggendo i *Cogitata physico-mathematica* (Parigi, 1644) di Mersenne, aveva trovato nella descrizione del funzionamento del moschetto ad aria una prova tangibile del peso dell'aria. Contemporaneamente Boyle studiava Gassendi e riceveva da Samuel Hartlib informazioni sulle novità filosofiche continentali¹²⁹. Durante i primi anni cinquanta Boyle si era definitivamente convinto della falsità della teoria dell'*horror vacui* in relazione all'ascensione dei liquidi nelle cannule. Intorno al 1653 aveva eseguito personalmente l'esperimento di Torricelli, ma fu soprattutto dopo essersi trasferito da Stalbridge on Dorset a Oxford, nell'inverno del 1655-56, che

approfondì gli studi sull'esperienza barometrica, cimentandosi con esperienze mirate a comprendere la relazione tra il livello del mercurio e i cambiamenti meteorologici¹³⁰.

Nell'estate del 1660 a Oxford Boyle pubblicò la prima delle sue opere scientifiche, con il titolo di *New Experiments Physico-Mechanicall, Touching the Spring of the Air, and its Effects*. Il libro andò in stampa sotto la supervisione del virtuoso Robert Sharrock (1630 ca.-1684), che nel frattempo si occupava di tradurlo in latino in modo che le due edizioni uscissero in contemporanea. Il successo fu immediato: le prime cinquecento copie andarono esaurite praticamente subito¹³¹. L'opera presenta i resoconti di quarantatré esperimenti condotti con l'ausilio della nuova macchina pneumatica che Boyle e Hooke avevano da poco costruito. Il nuovo strumento diventò quasi immediatamente l'emblema della *Royal Society*, tanto che nel 1667 compariva sul frontespizio della *History of the Royal Society* di Thomas Sprat¹³². L'idea della macchina pneumatica traeva origine dallo strumento costruito da Otto von Guericke (1602-1686) nel 1647, una pompa aspirante composta da un cilindro, un pistone e due valvole, con la quale egli eseguì una serie di esperimenti che Gaspar Schott descrisse nella *Mechanica hydraulico-pneumatica* (1657). In Germania von Guericke era stato il primo a replicare l'esperimento di Torricelli che a suo parere dimostrava l'esistenza del vuoto. Nel libro di Schott apparvero la descrizione della pompa pneumatica e il resoconto della famosa dimostrazione della forza del vuoto compiuta lo stesso anno sulla piazza di Magdeburgo, quando Guericke mostrò che nemmeno la forza di trazione esercitata da due pariglie di cavalli riusciva a separare due emisferi di rame dai quali egli aveva precedentemente estratto l'aria.

Come Boyle racconta all'inizio dell'opera, l'idea di costruire una macchina che potesse essere utilizzata per verificare gli effetti della rarefazione dell'aria gli era venuta dopo aver letto il libro di Schott. Egli si era reso immediatamente conto della rilevanza degli esperimenti di von Guericke, tanto che Hartlib gli scrisse «parlate ancora del vuoto tedesco come di una bellezza straordinaria»¹³³. Contemporaneamente, però, Boyle aveva compreso che quello strumento necessitava di sensibili miglioramenti: la pompa di von Guericke richiedeva uno sforzo immane per essere azionata; inoltre, il recipiente montato su di essa era privo di aperture, non consentendo quindi di introdurre oggetti per testare gli effetti del vuoto. Infine, l'apparato presentava evidenti difetti di tenuta. Inizialmente Boyle si rivolse a Ralph Greatorex, il più famoso costruttore di strumenti scientifici di Londra, sembra senza alcun successo. Infatti, fu grazie a Hooke che nacque il primo esemplare della macchina pneumatica o pompa ad aria (*air-pump*), come Hooke stesso scrisse nell'autobiografia: «nel 1658, o 9, ideai e perfezionai la pompa ad aria (*air pump*) per il signor Boyle, avendo visto prima un congegno costruito per quello scopo dal signor Greatorex per la stessa onorevole persona, che era troppo rozzo per qualsiasi impiego di una certa importanza»¹³⁴. Lo strumento fu pronto all'inizio del 1659, mentre Boyle e Hooke si trovavano ancora a Londra. In primavera Boyle lo portò con sé a Oxford,

cominciando anche a cercare informazioni circa le indagini sull'aria che allora impegnavano i membri dell'accademia parigina di Montmor¹³⁵.

Di tali indagini egli veniva costantemente informato da Oldenburg, che all'epoca si trovava a Parigi in qualità di precettore per il *Grand Tour* di due dei nipoti di Boyle, Richard e Charles Boyle¹³⁶. Oldenburg inviava resoconti anche a Hartlib, che a maggio Hartlib scrisse a Boyle «mi meraviglio che il Signor Oldenburg non abbia scritto riguardo alla dotta assemblea settimanale di Parigi». A luglio-agosto finalmente Oldenburg gli inviò un resoconto, lamentando però la poca concretezza sperimentale dei francesi, «più inclini ai discorsi che attivi negli esperimenti»¹³⁷. Infine, probabilmente nel mese di novembre, Boyle e Hooke iniziarono gli esperimenti con la loro macchina pneumatica.¹³⁸ Quest'ultima consisteva di una pompa su cui era montato un recipiente di vetro. Il dispositivo di aspirazione era formato da un cilindro cavo dotato di un foro nella parte superiore per l'inserimento di una valvola, da un pistone e da una manovella; inoltre, il recipiente era dotato di un foro nella parte superiore per introdurre oggetti. L'aderenza tra cilindro e pistone doveva essere garantita da ritagli di pelle appositamente trattati, mentre per sigillare le valvole di chiusura e apertura Boyle e Hooke utilizzavano un mastice fatto di pece, resina e cenere¹³⁹.

L'attenzione di Boyle fino ad allora era stata catturata prevalentemente dalle proprietà chimiche dei corpi naturali; solo verso la fine degli anni Cinquanta egli cominciò a studiare sistematicamente le proprietà fisiche dell'aria, e lo fece per due motivi. Come scrisse nella dedicatoria al nipote, Boyle aveva scelto di trattare l'aria piuttosto che «uno qualsiasi degli argomenti di chimica, come ci si aspetterebbe» perché interessato il legame tra aria e vita che risultava evidente perfino dalla semplice osservazione quotidiana. In secondo luogo, egli riteneva che lo studio delle proprietà dell'aria fosse importante per comprendere tutta una serie di fenomeni normalmente attribuiti ad altre cause:

A scegliere questo piuttosto che un altro degli attesi argomenti chimici, per intrattenere vostra Signoria, sono stato decisamente spinto da queste due considerazioni. Innanzitutto, essendo l'aria tanto necessaria alla vita umana che non solo la maggior parte degli uomini, ma quasi tutte le altre creature che respirano non possono vivere molti minuti senza di essa, appare probabile che qualsiasi scoperta di un certo valore sulla sua natura si dimostri importante per l'umanità. In secondo luogo, perché l'aria circostante è quella cosa con la quale sia i nostri stessi corpi, sia la maggior parte degli altri corpi con cui abbiamo a che fare sulla terra, sono in contatto perpetuo, non solo le sue alterazioni hanno una parte cospicua ed evidente in quegli effetti visibili che gli uomini sono già stati portati ad ascriverle (come per esempio i vari disturbi che colpiscono i corpi umani, specie se delicati, in primavera e autunno, e anche in quasi tutti i grandi e improvvisi cambiamenti atmosferici), ma ulteriori scoperte sulla natura dell'aria probabilmente ci dimostreranno che essa contribuisce in maggiore o minore misura a rivelare molti fenomeni nei quali finora non si era neppure sospettato che avesse parte.

Nell'ambito del dibattito sulle proprietà fisiche dell'aria, la novità dell'opera di Boyle consisteva essenzialmente nell'aver dato una prova tangibile della dipendenza della pressione dell'aria dal peso e dall'elasticità. È soprattutto sotto questo aspetto che gli esperimenti di Boyle hanno attirato l'attenzione degli storici della scienza.

Lo strumento di Boyle e Hooke, almeno nella prima versione, era affetto da diversi difetti di tenuta, sui quali nel 1661 fece leva Hobbes per contestare l'interpretazione boyliana dell'elasticità e il valore conoscitivo degli esperimenti pneumatici stessi. Difetti che del resto erano riconosciuti dallo stesso Boyle, come dimostra uno degli esperimenti più importanti del libro, l'esperimento 17, con cui Boyle si proponeva di dimostrare al di là di ogni ragionevole dubbio l'ipotesi secondo cui la colonnina di mercurio dell'esperimento barometrico era sostenuta dalla pressione che l'aria esercita in virtù del peso e dell'elasticità sulla superficie del mercurio contenuto nella catinella. Esso consisteva in una variante più sofisticata dell'esperimento del vuoto nel vuoto di Pascal. Inserito l'apparato torricelliano nel globo di vetro della macchina pneumatica, azionata la pompa Boyle osservò che aspirazioni successive provocavano un abbassamento graduale del livello del mercurio. L'effetto era tutt'altro che sorprendente, poiché svuotando il recipiente la pressione ovviamente diminuiva. Il fatto che gli abbassamenti non fossero regolari, ma diminuissero via via che si procedeva con l'aspirazione, era spiegato ricorrendo all'elasticità. Il ragionamento era semplice e si fondava su un'ipotesi già formulata da Beeckman nelle pagine del suo diario scientifico e da Torricelli nella lettera di risposta alle osservazioni di Ricci. Infatti, inserendo l'apparato torricelliano nel recipiente della macchina, il livello del mercurio rimaneva invariato: ciò si spiegava con il fatto che l'aria è un corpo elastico, assimilabile a una spugna, come aveva osservato Beeckman, o a un vello di lana, come affermato da Torricelli. Gli strati inferiori, essendo gravati da un peso maggiore rispetto ai superiori, si trovano costantemente compressi, anche in un luogo chiuso. Ciò spiegava perché le pompe aspiranti continuava a funzionare anche in ambienti chiusi. Muovendo da questa constatazione, Boyle sperava di trovare una legge che esprimesse la relazione tra la densità (o grado di rarefazione o compressione, o volume) dell'aria e la sua elasticità. I successivi sviluppi delle ricerche di Boyle sulla dilatazione e compressione dell'aria, stimulate dagli esperimenti di Henry Power e Richard Towneley del 1653 e del 1661, lo condurranno, nel 1662, a pubblicare nella seconda edizione dei *New Experiments*, precisamente nella parte intitolata *A Defence against Linus* in cui si occupava di confutare le obiezioni del gesuita Francis Line, alla prima formulazione della legge che porta il suo nome e che, non a caso, egli considerava come la dimostrazione della grande forza dell'elasticità. Una volta azionata la pompa, aveva osservato che le aspirazioni successive provocavano l'abbassamento graduale del livello del mercurio. L'effetto era tutt'altro che sorprendente, dal momento che la pressione che l'aria esercitava sul mercurio nella catinella era diminuita. Tuttavia, non era stato possibile svuotare completamente il tubo, dato che all'interno del recipiente

rimaneva comunque una piccola quantità di aria che si insinuava per qualche piccola strada, e che era sufficiente a controbilanciare la pressione di un cilindro di mercurio, come quello che rimaneva nel tubo. Questo esperimento ebbe un ruolo fondamentale nella formulazione della legge che porta il nome di Boyle, poiché permetteva di intuire l'esistenza di una relazione tra elasticità e volume dell'aria.

Per le origini del concetto di elasticità bisogna fare un passo indietro e tornare in Francia. Che la pressione dipendesse da qualcos'altro oltre al peso dell'aria era chiaro fin dalla seconda metà degli anni quaranta, quando Etienne Noël e Roberval avevano eseguito due varianti dell'esperimento torricelliano. Il primo esperimento, eseguito da Noël, apparve nel 1648 nella *Gravitas comparata*, opera in cui egli riprendeva e sviluppava l'ipotesi cartesiana della materia sottile o etere. Noël, maestro di Descartes a La Flèche, aveva constatato che introducendo una piccola bolla d'aria nel tubo torricelliano, il mercurio si abbassava di più di quanto accadeva introducendo un pari volume d'acqua. Il risultato era paradossale, dato che si sapeva, come aveva stabilito Galileo, che l'acqua era circa 460 volte più densa e pesante dell'aria (Mersenne aveva misurato questo rapporto in 1: 1356)¹⁴⁰. Era chiaro che la discesa del mercurio non era causata soltanto dal peso: Noël attribuì questo effetto all'etere, sostenendo che esso fosse presente in maggiore quantità nell'aria che nell'acqua. Con il celebre esperimento condotto con la vescica di una carpa inserita nel tubo torricelliano, Roberval concluse che sopra la colonnina di mercurio non vi era una sostanza eterea, ma aria rarefatta, ipotesi dimostrata dal grande potere di espansione dell'aria o resistenza alla compressione o potere di resilienza (*resiliendum facultas*) che si manifestava con il rigonfiamento della vescica posta al di sopra del mercurio quando veniva capovolto il tubo. Questo potere di espansione spiegava anche la maggiore discesa del mercurio nell'esperimento di Noël: era la forza di dilatazione a causarla (*vi aut appetitum ad rarefactionem*). Roberval aveva inoltre compreso che questa forza diminuiva al crescere del volume. I filosofi naturali inglesi erano venuti a conoscenza dell'esperimento di Roberval grazie agli *Experimenta Nova Anatomica* (1651) di Jean Pecquet, opera in cui l'autore divulgò le sue recenti scoperte in campo medico e fisiologico, il ricettacolo del chilo e il dotto toracico. Essa comprendeva anche una sezione sulla pressione dell'aria, nella quale, oltre a presentare i resoconti degli esperimenti del Puy de Dôme e del vuoto nel vuoto, aveva introdotto nel linguaggio il termine elasticità, affermando esplicitamente all'inizio della sezione sulla pressione dell'aria, che l'aria aveva non soltanto peso, ma anche elasticità, che rappresentava così una concausa nei fenomeni della pressione. Pecquet adottava una concezione dell'aria in cui fondeva le idee di Beeckman e Roberval, sostenendo che l'aria fosse come una spugna o un vello di lana che premeva sulla superficie terrestre, in modo che ogni strato subiva la pressione di tutti quelli sovrastanti. Una volta tolto questo peso, l'aria si dilatava. Tale tendenza era dovuta non solo al peso, ma anche all'elasticità. Pecquet utilizzò il termine «elaterem», ossia elasticità, per indicare questa tendenza

spontanea dell'aria a dilatarsi quando sottoposta a compressione: «le parti dell'aria situate tra il tubo e la vescica di carpa si espandono per dilatazione spontanea. Quindi la sostanza dell'aria al suo interno per rarefarsi imita la natura elastica della spugna o della lana (*elater spongiae lanae naturam imitatur*)»¹⁴¹. L'importanza dell'opera di Pecquet risiede soprattutto nel contributo che diede alla diffusione in Inghilterra degli esperimenti francesi e nell'adozione di una terminologia che influenzò Boyle e gli altri filosofi naturali inglesi che si occuparono del vuoto e delle proprietà dell'aria, da Walter Charleton a Henry Power e Robert Hooke.¹⁴²

Indagini di questo tipo erano scaturite dal disaccordo esistente sulla natura dello spazio al di sopra del mercurio. Oltre alla tradizionale opposizione tra vuoto democriteo e pienismo aristotelico, nella seconda metà del XVII secolo il dibattito intorno all'esperimento di Torricelli e ai fenomeni pneumatici coinvolse anche l'altra e più moderna versione del pienismo, quella cartesiana. Da un lato vi era chi sosteneva che l'espansione dell'aria fosse imputabile al movimento intrinseco di particelle separate da vuoti microscopici; dall'altra chi credeva che l'elasticità fosse spiegabile attraverso il movimento vorticoso di una materia sottile ed eterea, che penetrando i corpi più compatti come il vetro andava ad aggiungersi alle altre particelle aeree. Le due interpretazioni implicavano differenti posizioni non solo sull'effettiva natura dello spazio torricelliano, ma anche sul moto delle particelle, che secondo gli atomisti era assimilabile a un'attività spontanea presente nella materia, mentre per i cartesiani derivava sempre da una spinta esterna. Tuttavia, non sempre le posizioni erano così nette: per esempio, Henry Power adottò il pienismo cartesiano, ma considerò la materia sottile come il sostrato passivo in cui si muovono le particelle d'aria, introducendo così un'attività innata delle particelle di materia, diversamente da Descartes che attribuiva il moto dei corpuscoli aerei al turbino della materia celeste¹⁴³. Comunque, a differenza degli aristotelici, cartesiani e atomisti condividevano la convinzione che i fenomeni naturali fossero il risultato del moto, delle dimensioni e della forma di corpuscoli materiali. Un caso a parte è il pienismo hobbesiano: Hobbes riteneva infatti che nello spazio torricelliano, così come nel recipiente della macchina pneumatica, vi fosse aria estremamente rarefatta, precisamente quella parte dell'aria depurata dagli effluvi di terra e acqua, che chiamava *aer purus*, una sostanza eterea priva di peso¹⁴⁴.

I *New Experiments* rappresentarono una grande novità nel contesto della discussione intorno al risultato dell'esperimento torricelliano. La macchina pneumatica consentiva infatti di ottenere artificialmente un ambiente rarefatto e studiare la risposta in esso su oggetti inanimati ed esseri viventi. Con il termine *vacuum* Boyle non intendeva l'assenza di qualsivoglia sostanza materiale: «non uno spazio in cui non c'è nessun corpo, ma tale che sia del tutto, o quasi totalmente privo di aria». Fatta questa premessa, il primo dei quarantatré esperimenti serviva a Boyle per introdurre «quella nozione con cui sembra probabile che la maggior parte, se non tutti si dimostreranno spiegabili», ossia l'elasticità,

una molla, o una forza elastica (elastical power) che è nell'aria in cui viviamo [...] e con ciò intendo questo: che la nostra aria consiste – o, almeno, contiene in abbondanza – di parti di una natura che, quando sono piegate o compresse dal peso della parte sovrastante dell'atmosfera, o da qualsiasi altro corpo, cercano, per quanto è loro possibile, di liberarsi da tale pressione, premendo contro i corpi contigui che le tengono piegate e, appena tali corpi sono allontanati o costretti a lasciarle passare, dispiegandosi istantaneamente ed estendendosi completamente per quel tanto che i corpi contigui, che oppongono resistenza, lo permettono, provocano in tal modo un'espansione dell'intera massa d'aria che queste particelle elastiche compongono .

Tuttavia, se l'elasticità poteva essere ammessa in presenza di una visibile compressione dell'aria, come accadeva con «il moschetto ad aria ed altre macchine pneumatiche», nel recipiente della nuova air-pump di Boyle e Hooke non vi era alcuna manifesta pressione. A questa possibile obiezione Boyle rispondeva con l'altra proprietà fisica, il peso: «nonostante le scuole insegnino il contrario, abbiamo diversi esperimenti che ci dimostrano che l'atmosfera in cui viviamo non è leggera, ma pesante . Quella forza di espansione che mostrava i propri effetti all'interno del recipiente della macchina – per esempio, era possibile gonfiare una vescica aumentando il volume fino a 150 volte prima di provocarne l'esplosione; per spingere il pistone dopo lo svuotamento del contenitore era necessario un peso di 122 libbre – non procedeva infatti da una compressione visibile, ma da quella che esercitavano i corpuscoli degli strati superiori dell'atmosfera su quelli inferiori, e che in prossimità della terra diventava massima.

All'epoca esistevano sostanzialmente due modelli per rendere conto del potere di espansione dell'aria: l'uno strutturale e l'altro cinetico. Nel primo caso Boyle immaginava che l'aria fosse simile a un vello di lana, composta cioè da corpuscoli simili a fili di lana greggia che, come le molle, quando vengono compressi tendono a estendersi e riacquistare così il volume originario, manifestando un certo «potere o principio di auto-dilatazione». L'analogia impiegata da Boyle era la medesima a cui aveva fatto ricorso Torricelli nella lettera a Ricci, mentre Beeckman aveva preferito paragonare l'aria a una spugna. Boyle non citava nessuno dei due, ma dalle sue parole è difficile non pensare che ne avesse almeno sentito parlare: «questo potere di auto-dilatazione è più evidente in una spugna asciutta che in un vello di lana. Ma in questa occasione abbiamo scelto quest'ultimo, perché non rappresenta un corpo intero, ma un insieme di corpi sottili e flessibili, mescolati confusamente, come sembra essere l'aria» .

Il modello cinetico veniva adottato invece dal «geniale gentiluomo, il Signor Descartes»: Boyle riassumeva brevemente la spiegazione che Descartes aveva dato della tendenza espansiva dell'aria. Per il filosofo francese l'aria era infatti composta non da corpuscoli simili a molle, ma da due differenti ordini di particelle: «un mucchio di parti del terzo elemento», ossia da particelle grossolane (le stesse di cui sono fatti la Terra, i

pianeti e le comete) slegate le une dalle altre, e da «piccoli globi celesti» che le circondano, particelle che costituiscono la materia di cui sono composti i cieli. Accanto a questi due ordini di elementi Descartes poneva il «primo elemento», termine con cui indicava particelle indefinitamente piccole capaci di riempire ogni interstizio lasciato libero dagli altri due, ma che non entrava nella composizione dell'aria. Il primo elemento formava la materia subtilis, la materia di cui sono fatti il Sole e le stelle fisse, che insieme alle particelle del secondo elemento costituiva la materia celeste, la sostanza eterea e fluida dei cieli. Pur essendo formata in gran parte da particelle grossolane, l'aria è un corpo fluido e trasparente poiché le parti del terzo elemento sono talmente disgregate da seguire qualsiasi movimento delle particelle del secondo. Sulla base di tale concezione Descartes spiegava il potere di espansione che l'aria manifestava sia naturalmente sia quando sottoposta a compressione violenta con il reciproco respingimento delle particelle del terzo e del secondo elemento, che in tal caso avevano a disposizione uno spazio minore per i rispettivi movimenti. Boyle parafrasava così la dottrina cartesiana:

«Secondo questa ipotesi, quindi, ha pochissima importanza che le particelle d'aria possiedano la struttura propria delle molle, o abbiano una qualsiasi altra forma [...] poiché il loro potere elastico non è tale da dipendere dalla forma o struttura, ma dall'agitazione violenta e, per così dire, dal movimento veemente che è stato loro impresso dall'etere fluido che si insinua rapidamente tra esse, e turbinando intorno a ciascuna [...] non solo mantiene separati e in espansione [...] quei sottili corpi aerei, [...] ma fa sì che si urtino gli uni con gli altri e si respingano, necessitando quindi di più spazio di quello che altrimenti occuperebbero se fossero compressi» .

Per spiegare l'azione delle pompe nelle fontane o il funzionamento del moschetto ad aria, Descartes adottava quella che de Waard descrisse come una rielaborazione moderna dell'antica teoria platonica dell'antiperistasi. Essa fu originariamente elaborata da Platone e poi ripresa da Aristotele che attribuì il nome di antiperistasi al movimento vorticoso dei corpi nel plenum. Si tratta di un movimento circolare che secondo Platone seguiva una traiettoria raffigurabile con due archi di cerchio descritti in sensi opposti; in un mondo pieno ogni corpo provvisto di questo movimento sposta tutti quelli che lo seguono. Dai pienisti dell'Antichità l'antiperistasi veniva impiegata in contrapposizione all'attrazione per spiegare tutti quei fenomeni associati all'orrore della natura per il vuoto, dal sollevamento delle acque nei sifoni all'ascensione dei liquidi per suzione. Descartes aveva rinnovato quella teoria ipotizzando il movimento vorticoso dell'etere tra i corpuscoli del terzo elemento, spiegando così tutti quei fenomeni che invece altri attribuivano alla pressione.

Descartes riconosceva che l'aria possedeva un peso, ma in realtà ciò che Beeckman attribuiva alla pressione degli strati superiori sugli inferiori Descartes lo spiegava supponendo che il movimento continuo dei vortici di etere spostasse le parti contigue di

aria, che a loro volta tornavano ad occupare il posto delle altre parti spinte verso l'alto. Per questo, nonostante l'aria avesse un peso, gli oggetti e gli esseri viventi non lo avvertivano.

Nei *New Experiments* Boyle considerava i due modelli sostanzialmente equivalenti dal punto di vista ontologico: non si poteva determinare con certezza quale dei due fosse più aderente alla realtà fisica. Determinare quale fosse la «vera causa dell'elasticità dell'aria» era una questione «più difficile di quanto si potrebbe a prima vista immaginare», dal momento che gli esperimenti manifestavano solamente gli effetti della pressione dovuta al peso e all'elasticità:

«Determinare se il movimento di restituzione nei corpi procede da questo, che le parti di un corpo con una particolare struttura sono poste in moto dalla flessione della molla, o dallo sforzo di un qualche corpo sottile che le circonda, [...] mi sembra una questione molto più difficile di quanto si potrebbe a prima vista immaginare. Quindi eviterò di trattare un argomento che è di gran lunga più complicato spiegare di quanto sia necessario per colui che si occupa [...] non di assegnare la causa adeguata all'elasticità dell'aria, ma solo di rivelare che l'aria possiede un'elasticità, e di riferire alcuni dei suoi effetti»¹⁴⁵.

Come aveva spiegato nell'avvertenza al lettore, suoi esperimenti avrebbero certamente «risvegliato i pensieri degli uomini, spingendoli a nuove speculazioni»¹⁴⁶; per quanto lo riguardava, Boyle si accontentava di esprimere la preferenza per l'interpretazione strutturale, dato che gli sembrava di più facile comprensione. Supponendo che i corpuscoli aerei siano simili a piccoli archi o molle, e che l'aria nel suo complesso sia come un vello di lana composto da strati, non c'era bisogno di ricorrere al movimento vorticoso dell'etere, la cui esistenza e natura erano fonti di difficoltà. Se gli esperimenti non permettevano di decidere tra interpretazione strutturale e cinetica, tuttavia essi indicavano chiaramente che «l'atmosfera in cui viviamo non è (come invece appare rispetto ad altri corpi più pesanti) leggera, ma pesante». Anche se non vi era alcuna compressione percepibile a manifestare l'elasticità, l'aria era naturalmente elastica perché dotata di peso, dal momento che gli strati superiori dell'atmosfera esercitano una pressione su quelli inferiori. Così, per esempio, si spiegava perché la colonnina di mercurio del barometro rimaneva a un livello più basso quando si eseguiva l'esperimento di Torricelli sulla cima di una montagna: «sembra abbastanza chiaro che il motivo di tutto ciò sia che sulle cime delle alte montagne l'aria, che comprime il mercurio fermo, subisce una pressione minore da parte dell'aria sovrastante meno pesante»¹⁴⁷.

Tra i quarantatré esperimenti che compongono i *New Experiments* ve n'è uno «la cui riuscita», Boyle affermava, «era il frutto principale che mi ero ripromesso di ottenere con la nostra macchina». Si tratta dell'«Esperimento 17», il titolo sotto cui Boyle descriveva una variante dell'esperimento pascaliano del vuoto nel vuoto. Esso era della massima rilevanza per la controversia tra vacuisti e pienisti, tanto che Boyle l'aveva ripetuto più

volte, anche in presenza di Wallis, Seth Ward e Christopher Wren. In breve, egli aveva inserito l'apparato torricelliano nel recipiente della macchina pneumatica; una volta azionata la pompa, aveva osservato che le aspirazioni successive provocavano l'abbassamento graduale del livello del mercurio. L'effetto era tutt'altro che sorprendente, dal momento che la pressione che l'aria esercitava sul mercurio nella catinella era diminuita. Tuttavia, non era stato possibile svuotare completamente il tubo, dato che all'interno del recipiente rimaneva comunque una piccola quantità di aria che si insinuava «per qualche piccola strada» e che, Boyle concludeva «era sufficiente a controbilanciare la pressione di un cilindro di mercurio, come quello che rimaneva nel tubo»¹⁴⁸. Commentando il risultato, Boyle sottolineò come in realtà la macchina pneumatica non consentiva di stabilire con certezza se lo spazio nel recipiente era realmente vuoto. Per esempio, gli oggetti posti in esso risultavano pur sempre visibili, e questa era una prima e importante difficoltà. Altri esperimenti avevano inoltre mostrato che il vuoto pneumatico non influiva sull'attrazione magnetica. Così, quell'esperienza tanto promettente non aveva dato il risultato sperato, e Boyle professava il proprio agnosticismo:

«La Vostra Signoria forse si aspetterà che, come coloro che hanno trattato l'esperimento *torricelliano*, che per la maggior parte hanno sostenuto l'affermativa o la negativa di quella famosa questione, se o no quel nobile esperimento implichi un *vuoto*, così in questa occasione anch'io dovrei avanzare la mia opinione riguardo quella controversia, o almeno dichiarare se nella nostra macchina l'aspirazione dell'aria dimostri o meno che effettivamente lo spazio privo dell'aria estratta sia veramente vuoto, cioè privo di ogni sostanza materiale. Ma a parte il fatto che non ho né l'agio né la capacità di introdurre in un dibattito solenne su una questione tanto sottile [...] nemmeno per ora oso prendermi la briga di decidere una controversia tanto difficile»¹⁴⁹.

Per ora, dunque la disputa tra vacuisti e pienisti rimaneva nell'ambito metafisico: i primi sostenevano l'esistenza del vuoto solo in base all'assenza di aria e di altri corpi percepibili, mentre i pienisti ritenevano che lo spazio sopra il mercurio fosse pieno di materia sottile solo appoggiandosi alla definizione di *res extensa*:

«In realtà a me sembra ancora che, a proposito di questi spazi che i *vacuisti* considerano vuoti perché sono chiaramente privi d'aria e di qualsiasi altro corpo più consistente, i *pienisti* (se così posso chiamarli) non dimostrano che tali spazi sono pieni di quella materia sottile di cui essi parlano, spiegandola con dei suoi effetti o delle sue azioni sensibili (che diversi nuovi esperimenti appositamente compiuti non mi hanno assolutamente rivelato), bensì si limitano alla conclusione che ci deve essere tale materia, per la semplice ragione che non può esistere il vuoto. Inoltre il motivo per cui non può esistere il vuoto essi non lo derivano da nessun esperimento o fenomeno della natura che provi in modo chiaro e preciso la loro *ipotesi*, ma dal loro concetto di corpo. Secondo loro, infatti, poiché la natura di un corpo consiste solo nella sua estensione

(che, a dire il vero, sembra la proprietà a esso più essenziale, essendone inseparabile), definire uno spazio vuoto di qualsiasi corpo è, per dirlo con l'espressione degli scolastici, una contraddizione *in adjecto*. Questo motivo, dicevo, essendo così desunto, sembra rendere la controversia sul vuoto una questione più metafisica che fisica, che quindi non discuteremo più in questa sede, poiché troviamo molto difficile sia convincere i naturalisti di questo concetto cartesiano di corpo, sia dimostrare dove esso sia erroneo e sostituirvene uno migliore»¹⁵⁰.

Gli esperimenti con la macchina pneumatica rivelavano solo l'esistenza di una dipendenza funzionale tra elasticità e pressione, escludendo la presenza di una tendenza a prevenire la formazione di spazi vuoti. Boyle era convinto che in filosofia naturale dovessero valere anzitutto i fenomeni e gli esperimenti particolari. Ai suoi occhi non era lecito dedurre una verità fisica da un principio metafisico com'era l'identificazione cartesiana di materia ed estensione. In filosofia naturale era necessario procedere da esperimenti e fatti particolari che potevano sì confermare o invalidare una certa ipotesi, ma non escluderla *a priori*.

L'evidenza sperimentale disponibile non permette infatti di decidere tra i due modelli di spiegazione allora disponibili, quello cartesiano, fondato sull'ipotesi del movimento della materia sottile, e quello atomista, secondo il quale i corpuscoli dell'aria sono provvisti di un «potere o principio di auto-dilatazione» che li rende simili a piccole molle. Boyle dichiara di preferire quest'ultimo perché rispetta il principio di economia – prescinde infatti dall'assunzione di un'ipotesi indimostrata come quella della materia sottile –, ma non per questo ritiene di doversi pronunciare sulla verità o falsità delle due ipotesi.

Dopo aver esaminato le ragioni che militano pro e contro il vuoto, Boyle conclude che la disputa tra le due «sette» di filosofi moderni, gli atomisti e i cartesiani, si riduce al dissenso sul concetto di corpo, che i cartesiani considerano inseparabile dall'attributo fondamentale della materia, l'estensione. L'intento di Boyle è precisamente liberare le indagini sull'esistenza del vuoto dagli aspetti metafisici, per ricondurle invece nell'alveo della fisica (o filosofia sperimentale) e della tradizione della storia naturale. In questo contesto, dominato dalla forza probante degli esperimenti, Boyle conclude che 1) allo stato attuale delle conoscenze non esistono prove dell'esistenza della materia sottile; 2) i fenomeni del vuoto dipendono dalla pressione dell'aria, che varia in proporzione all'altezza (come aveva dimostrato Pascal); 3) l'aria esercita una pressione uniforme sui corpi che circonda; 4) tale pressione è il risultato del peso e dell'elasticità; 5) con la macchina pneumatica è possibile determinare quantitativamente la relazione tra espansione dell'aria (o volume) e forza dell'elasticità.

Se Boyle non si esprime apertamente né a favore di una delle due interpretazioni dell'elasticità né per l'esistenza del vuoto assoluto – quando parla di vuoto dichiara più volte di intendere semplicemente uno spazio privo di aria: «Se per vuoto intendiamo un

luogo perfettamente privo di ogni sostanza materiale, si può in realtà affermare, come notato precedentemente, che al mondo non esista una cosa simile» –, tuttavia egli respinge fermamente la dottrina dell'*horror vacui*. Sono anzitutto i risultati sperimentali, presenti e passati, a smentire l'ipotesi di una resistenza infinita alla formazione di spazi vuoti. Gli effetti osservati nel recipiente della macchina pneumatica sono il risultato della pressione e della struttura particolare dei corpi fluidi. Si può dunque parlare di «orrore» della natura solo in senso «metaforico e accidentale», tanto più che numerosi effetti mostrano l'inconsistenza della presunta cura della natura per il bene generale dell'universo, come Boyle afferma nell'esperimento 33:

Questi esperimenti possono inoltre indicarci come giudicare l'assioma tradizionale accettato per così tanti secoli come una verità indubitabile dalle scuole peripatetiche, vale a dire che la natura ha orrore e rifugge il vuoto [...] Considerato dunque il vuoto nell'accezione ovvia e comune del termine, la visione tradizionale sembra soggetta a diverse eccezioni, tra le quali alcune delle maggiori ci sono state suggerite dalla nostra macchina. Non sarà quindi facile spiegare come odio e ripugnanza, che sono passioni dell'anima, possano sussistere nell'acqua o in qualsivoglia corpo inanimato, ed essere dirette contro il vuoto o qualsiasi altro oggetto. Non si può infatti supporre né che questi conoscano il momento in cui, se non si attivassero per impedirlo, si formerebbe il vuoto, né che siano così generosi da agire in contrasto a ciò che più si adatta alla loro conservazione particolare in vista del bene generale dell'universo. La verità intelligibile e probabile contenuta in questa espressione metaforica sembra dunque ridursi a questo: che il saggio Autore della natura (che giustamente si afferma abbia creato tutte le cose secondo numero, peso e misura) abbia disposto l'universo e le sue parti in modo tale che in esso sia difficile ottenere il vuoto, come se queste parti cospirassero deliberatamente per prevenirlo. [...] In secondo luogo, i nostri esperimenti sembrano inoltre indicare che la presunta ripugnanza della natura per il vuoto sia soltanto accidentale, prodotto in parte del peso e della fluidità, o almeno dalla natura fluida dei corpi che si trovano al suolo, e in parte, e forse principalmente, dell'elasticità dell'aria, la cui tendenza continua a estendersi in ogni direzione la porta a riunire precipitosamente o spingere i corpi contigui all'interno degli spazi dove non incontra una resistenza maggiore di quella che può vincere.

-
- ¹ Pascal (1998, vol. I, pp. 527-528).
- ² *Physica*, IV.6, 213b 22-26. Secondo Max Jammer nei primi pitagorici il concetto di spazio è ancora confuso con quello di materia. Solo più tardi, con Xuto, Filolao e Archita, si affermò la distinzione tra luogo (*topos*) o spazio, e materia. Cfr. Jammer (1966, trad. it., p. 20).
- ³ Cfr. *Physica*, VI.6, 213b 12. Cfr. anche Simplicio nel *Commento alla Fisica* di Aristotele: Simplicio, *Physica* 111, 18, in Giannantoni (1969, p. 318).
- ⁴ *Physica*, IV.6, 213a 22-27; Una descrizione più dettagliata dell'esperienza si trova in *Problemata Physica* aristotelici (914b 9-915a 27): cfr. Cohen-Drabkin (1948, pp. 245-246). Tuttavia fu Erone a presentare la prima descrizione completa della clessidra: cfr. *ivi*, pp. 327-328.
- ⁵ Sull'atomismo e il contesto filosofico in cui ebbe origine, cfr. Furley (1987, pp. 115-127).
- ⁶ *Physica*, IV.4, 212a 5-6, 20-21 citato da Aristotele (2008, vol. I, p. 141).
- ⁷ *Ivi*, IV.8 216a ss. Sull'argomentazione aristotelica e il principio di impenetrabilità cfr. Grant (1981, pp. 5-6) e *Id.* (1978, pp. 551-552).
- ⁸ *Physica*, IV.8, 215b-216a. Cfr. Furley (1987, pp. 191-192).
- ⁹ Cfr. *Physica*, IV.8, 215a 14-19; *Timeo* (59A, 79B, 79C). Sull'antiperistasi e i fenomeni del vuoto nell'Antichità cfr. Waard (1936, pp. 48-55). Per la teoria del moto di Aristotele, cfr. Yavetz (2015).
- ¹⁰ *Physica*, IV.6, 217a 20-217b 12. Nel *De generatione et corruptione* Aristotele afferma esplicitamente che nella trasformazione dell'acqua in aria, benché la massa aumenti, non si ha un mutamento secondo la quantità: *De generatione et corruptione*, I, 321a 10-29.
- ¹¹ Cfr. *De coelo*, IV.4, 311b 3-12.
- ¹² Cfr. *Physica*, IV.8, 215b.
- ¹³ Cfr. *De coelo*, IV.5, 312b 5-15.
- ¹⁴ Cfr. *Pneumatica*, 8, in Cohen-Drabkin (1948, p. 256). Per le idee di Filone sul vuoto, cfr. *Philo of Byzantium Pneumatica. The First Treatise on Experimental Physics: Western Version and Eastern Version*, with notes on other manuscripts and illustrations, historical introduction, and technical commentary by Frank David Prager, Wiesbaden, Reichert, Wiesbaden 1974, pp. 80-82.
- ¹⁵ Cfr. Cohen-Drabkin (1948, pp. 326-327); Waard (1936, pp. 22-23).
- ¹⁶ Cfr. Duhem (1958, vol. VIII, p. 158ss); Grant (1981, pp. 67-68).
- ¹⁷ Cfr. Grant (1973, pp. 328-329).
- ¹⁸ Cfr. Waard (1936, pp. 56-59). Alla teoria della doppia natura fecero ricorso anche Tommaso d'Aquino, Giovanni di Jandun e Giovanni Buridano. Sulla teoria della doppia natura cfr. anche Grant (1973, p. 330n, 334n); *Id.* (1981, pp. 69-70).
- ¹⁹ Cfr. Grant (1981, pp. 77-95).
- ²⁰ Lucrezio, *De rerum natura*, I, 385-390, citato da Lucrezio (2004, p. 91).
- ²¹ Cfr. Grant (1981, pp. 87-95) e le fonti *ivi* citate.
- ²² Su D'Autrecourt cfr. Grellard (2009, pp. 107-126) e Grant (1981, pp. 74-77).
- ²³ «Quod prima causa non posset plures mundos facere»; «Quod Deus non possit movere celum motu recto. Et ratio est, quia tunc relinqueret vacuum». Cfr. Denifle-Chatelain (1889-1897, vol. 1, pp. 545-546) e Grant (1974, p. 48).

²⁴ Cfr. Grant (2001, trad. it. pp. 124-126) e Id. (1965). Pierre Duhem affermò che la condanna di questi due articoli liberò una volta per tutte la scienza medievale dalla metafisica e dalla cosmologia aristoteliche, aprendo così alle discussioni sulla possibile esistenza del vuoto e di altri mondi. Essa fu talmente importante da rappresentare l'atto di nascita della scienza moderna: una tesi, questa, che Alexander Koyré negò decisamente. Cfr. Duhem (1906-1913, vol. II, p. 412). Grant assume una posizione più moderata, sostenendo che la condanna di Tempier allargò certamente gli orizzonti filosofici dei pensatori medievali, anche se non modificarono la struttura fondamentale della filosofia naturale: cfr. Grant (2001, trad. it. p. 127).

²⁵ Cfr. Schmitt (1967, pp. 352-366).

²⁶ Cfr. Porta (1606, pp. 13, 18, 19-20).

²⁷ Cfr. Waard (17-19). Sulle pompe idrauliche nel Rinascimento, cfr. Nenci (2008) e Singer-Holmyard-Hall-Williams (2013, trad. it., tomo I, pp. 335-340).

²⁸ Cfr. Nenci (2008, pp. 63-87).

²⁹ *De coelo*, IV.4, 311b 9-10, citato da Aristotele (2008, p. 415).

³⁰ Cfr. Waard (1936, pp. 41-44, 68-72); Nonnoi (1988, pp. 103-105). Nel panorama medievale un'altra eccezione è rappresentata da Giovanni di Jandun, che affermò, probabilmente rifacendosi ad Averroè, che l'acqua pesa nel proprio luogo naturale. Più tardi Giovambattista Benedetti e Paolo Sarpi ebbero l'intuizione di una pressione laterale, ma non la svilupparono.

³¹ Cfr. Stevin (1634, p. 500); Duhem (1905, pp. 599-604); Dijksterhuis (1970, pp. 64-69) e Id. (trad. it. 1980², p. 500); Waard (1936, pp. 72-73).

³² Cfr. Waard (1936, pp. 75-85, in particolare pp. 76-77) e gli estratti del *Journal* ivi citati. A partire dalla fine degli anni Trenta del secolo scorso, C. de Waard pubblicò l'intero diario scientifico di Beeckman, che occupa ben quattro tomi. Per il volume relativo al periodo in esame, cfr. Id (1939).

³³ Cfr. Waard (1953, p. 44).

³⁴ Per una disamina della filosofia naturale di Beeckman e del contenuto del diario alla luce delle sue idee sulla struttura corpuscolare della materia, cfr. Berkel, (2013, in particolare pp. 86-103).

³⁵ Per le idee di Galileo sul vuoto e la confutazione dell'argomento aristotelico nel *De motu*, cfr. OG I, pp. 282-284, 294-296 e Galluzzi (2011, pp. 18-19). Le idee galileiane sul moto nel vuoto sono il risultato dell'integrazione di atomismo democriteo e teoria idrostatica archimedeica (ivi, p. 16).

³⁶ Cfr. Galluzzi (2011, pp. 30-31), che illustra molto bene come la posizione galileiana fosse il risultato di una felice combinazione tra teoria idrostatica archimedeica e il principio pseudo-aristotelico delle velocità virtuali, che Galileo aveva tratto dalle *Questioni meccaniche*.

³⁷ OG iv, p. 88.

³⁸ Ivi, p. 97.

³⁹ Ivi, p. 98.

⁴⁰ Ivi, p. 135.

⁴¹ Ivi, pp. 99-100.

⁴² Ivi, p. 102.

⁴³ Ibid.

⁴⁴ Galluzzi (2011, pp. 33-36) e OG IV, pp. 105-107.

⁴⁵ Alla fine del 1612 uscirono altre due opere contro il *Discorso*, una di Giorgio Coresio, lettore di greco allo Studio di Pisa, intitolata *Operetta intorno al galleggiare de' corpi solidi*, l'altra dell'antico avversario di Galileo, Ludovico delle Colombe, che diede alle stampe il *Discorso Apologetico...d'intorno al Discorso di Galileo Galilei*. Nel 1613 fu la volta delle *Considerazioni sopra 'l Discorso di Galileo Galilei* di Vincenzo di Grazia. Mentre gli opuscoli di d'Elci e Coresio furono ignorati, Galileo decise di affidare al discepolo Benedetto Castelli la replica a Delle Colombe e a Di Grazia, scrivendo però di suo pugno parte dell'opera intitolata *Risposta alle opposizioni del S. Lodovico delle Colombe...*, stampata a Firenze nel 1615. Cfr. OG IV, pp. 5-6 e Camerota (2004, pp. 234-288)

⁴⁶ Cfr. OG IV, pp. 290-291.

⁴⁷ Cfr. OG IV, pp. 297-310, in particolare p. 301.

⁴⁸ Esperienza che Beeckman riportò di aver visto da un italiano di passaggio dai Paesi Bassi (*Journal*, f. 356), e che riferì a Mersenne nella lettera del 30 aprile 1630 (*Correspondance de Mersenne*, II, 458, 475).

⁴⁹ Per gli «atomi ignei», cfr. OG IV, p. 131 e Galluzzi (2011, pp. 39-40, 49-51). In seguito Galileo presentò una spiegazione alternativa del funzionamento del termoscopio, come conferma un frammento posteriore su cui si è soffermato Valleriani (2010, pp. 183-186) e OG VIII, pp. 634-635. In ogni caso, egli continuò a sostenere una versione della dottrina dell'*horror vacui*.

⁵⁰ Waard (1936, pp. 85-86).

⁵¹ Salvati a Galileo, 27 dicembre 1613, OG XI, p. 610. Su Baliani rimandiamo a Nonnoi (1988), Costantini (1969). Per i rapporti con Galileo e la rivendicazione della priorità nella scoperta della legge di caduta dei gravi, cfr. Moscovici (1967).

⁵² Cfr. rispettivamente OG XII, pp. 20, 34-36. Per determinare quella proporzione Galileo prese due fiaschi uniti da un ditale di cuoio provvisto di un'animella al centro. In un fiasco immise aria con l'aiuto di uno schizzatoio, nell'altro una certa quantità d'acqua. Pesando i due fiaschi apparve che tolto il peso di questi, l'acqua pesava 460 volte più dell'aria.

- ⁵³ OG XIV, p. 125 e *infra*, pp.
- ⁵⁴ Cfr. *infra*, cap. I, e OG XIV, pp. 127-130.
- ⁵⁵ Cfr. Waard (1936, pp. 95-96). Nonnoi (1988, pp. 79-88) ritiene probabile che grazie a Mersenne, Baliani abbia avuto accesso alle idee di Beeckman prima di scrivere a Galileo nell'ottobre del 1630, anche se, come l'autore stesso riconosce, non esistono prove documentali convincenti. Baliani comunque conosceva l'opera di Stevin, e potrebbe aver derivato l'ipotesi della pressione proprio da essa.
- ⁵⁶ Cfr. MERSENNE (1945-1988, vol.); *An detur vacuum* tra gli *Opuscula* in BALIANI (1666, pp. 278-284)
- ⁵⁷ Cfr. Galileo a Elia Diodati, 9 giugno 1635, OG XVI, p. 273.
- ⁵⁸ Cfr. Galluzzi (2011, cap. VIII, in particolare pp. 97-103). Come ha osservato lo studioso, Galileo conservò un atteggiamento ambiguo riguardo al vuoto separato, probabilmente in ragione della condanna del 1633 e dell'ostilità degli ambienti cattolici, soprattutto dei Gesuiti, che associavano direttamente il vuoto con l'epicureismo.
- ⁵⁹ AT II 383, citato da Descartes (2005, p. 881).
- ⁶⁰ Cfr. Descartes a Renieri, 2 giugno 1631, AT I 205-206 e Descartes (2005, pp. 199). Quando scrisse a Renieri Descartes stava attendendo alla composizione di *Le Monde*. Infatti, il modello del vortice per spiegare il moto nel pieno ricorre anche in quest'opera: cfr. AT XI 17-23; Waard (1936, pp. 98-100).
- ⁶¹ Cfr. Espressione impiegata dallo stesso Galileo in una lettera a Torricelli del 1641, cfr. OG XVIII, pp. 358-359. Per il rapporto antecedente di Castelli con Magiotti e Torricelli, cfr. OG XIV, pp. 359-360 (Castelli a Galileo, 19 giugno 1632). Su Magiotti e Nardi, cfr. Torrini (1979, pp. 53-88).
- ⁶² Di recente sono emerse due lettere di Berti a Cassiano dal Pozzo: cfr. Favino (2013).
- ⁶³ Cfr. OG VIII, pp. 18-19; Castelli a Galileo, 12 febbraio 1639, OG XVIII, p. 26; Jean-Jacques Bouchard a Vincenzo Capponi, *ivi*, p. 45.
- ⁶⁴ Magiotti a Mersenne, 12 marzo 1648, Mersenne (1945-1988, vol. XVI, pp. 168-170).
- ⁶⁵ Cfr. Waard (1936, p. 103). Middleton (1964, p. 10) propendeva per la seconda ipotesi.
- ⁶⁶ Mersenne (1945-1988, vol. XVI, p. 170).
- ⁶⁷ Zucchi pubblicò la relazione in un opuscolo uscito anonimo nel 1648, ristampato in *Nova de machinis philosophia ...* (Roma, 1649). Kircher ne parlò l'anno successivo nella *Musurgia universalis* (Roma, 1650). Cfr. Middleton (1964, p. 15), documenti pubblicati in Waard (1936, pp. 176-178, 182-184), insieme alla lettera di Magiotti e all'estratto dal *Cursus philosophicus* di Maignan.
- ⁶⁸ Cfr. Waard (1936, pp. 104-108). Sia secondo Corneliis de Waard che Middleton (1964, p. 15) è del tutto probabile che Maignan sostenesse l'ipotesi della pressione già all'epoca dell'esperimento di Berti.
- ⁶⁹ Mersenne (1945-1988, vol. XVI, p. 170) e Waard (1936, pp. 108-109).
- ⁷⁰ Cfr. Waard (1936, p. 139) e lettera di Orazio Grassi a Baliani, Mersenne (1945-1988, vol. XV, p. 593). Fabri eseguì l'esperimento tra il 1640 e il 1641, ma rifiutò l'ipotesi della pressione, allineandosi alle posizioni dei peripatetici.
- ⁷¹ Sull'invito ad Arcetri, cfr. OG VIII, pp. 21, 27-28; OG XIX, pp. 303, 308, 326. Sul soggiorno romano di Torricelli, cfr. Favino (2009). Sulla chiamata a Matematico del Gran Duca, ma non Filosofo, come invece era stato Galileo, cfr. Galluzzi (1979, p. 46).
- ⁷² Questa è l'ipotesi di Corneliis de Waard, che la ricava da una lettera di Tommaso Cornelio: Waard (1936, p. 111).
- ⁷³ Cfr. Favino (2013, p. 340)
- ⁷⁴ Waard (1936, pp. 110-112).
- ⁷⁵ Mersenne (1945-1988, vol. XVI, p. 170)
- ⁷⁶ Cfr. Gal. 79 – II, Galileo.V.9, car. 15r, Middleton (1963, pp. 17-18) e senza sostanziali variazioni, Id. (1964, pp. 20-21).
- ⁷⁷ Cfr. OG VIII, pp. 21-22, 25.
- ⁷⁸ Cfr. *infra*, cap., par.
- ⁷⁹ Cfr. C. Dati, *Lettera a Filaleti di Timauro Antiato*, Stella, Firenze 1663, p. 10.
- ⁸⁰ Cfr. Galluzzi, Torrini (1975, p. 123)
- ⁸¹ Cfr. Redondi (1983), secondo cui il vero motivo della condanna di Galileo fu la posizione atomista del *Saggiatore*. Ovviamente non ci soffermiamo sul dibattito sollevato dalla tesi di Redondi. Sulla battaglia dei Gesuiti contro l'atomismo, cfr. i saggi di Massimo Bucciantini e Maurizio Torrini in Torrini-Julien-Festa (1999) e Galluzzi (2011, pp. 79-80, 138-140). Cfr. anche Mazauric (2009, pp. 31-36).
- ⁸² Cfr. Dati (1663, p. 20) e Targioni Tozzetti (1780, tomo II, parte II, p. 443).
- ⁸³ Cfr. du Verdu a Torricelli, 9 luglio 1644, in Galluzzi, Torrini (1975, p. 140) e la precedente del 2 luglio, *ivi*, p. 138.
- ⁸⁴ Cfr. Ricci a Torricelli, 16 luglio 1644, *ivi*, p. 144, dove Ricci confessa anche di non essere ancora riuscito a mostrarle a Magiotti; du Verdu a Torricelli, 23 luglio, *ivi*, pp. 146-147; du Verdu a Mersenne, in Mersenne (1945-1988, vol. XIII, pp. 177-183). Per una prima edizione delle lettere arrivate a Parigi, cfr. Taton (1963, pp. 79-81).
- ⁸⁵ Cfr. Waard (1936, pp. 116-119). Sul passaggio di Mersenne a Firenze e il soggiorno a Roma, cfr. Mersenne (1945-1988, vol. XIII, pp. 240 n4, 279, 417, 423).

⁸⁶ Cfr. Des Noyers a Mersenne, 24 luglio 1647, in Mersenne (1945-1988, vol. xv, p. 319) e la precedente del 17 luglio a Roberval, in *ivi*, pp. 311-314 e Waard (1936, pp. 169-171)

⁸⁷ Cfr. Roberval a Des Noyers, 20 settembre 1647, in Mersenne (1945-1988, vol. xv, pp. 427-441); anche Pascal (1964-1992, vol. ii, pp. 443-477)

⁸⁸ Cfr. Magni fece poi stampare la sua lettera e quella di Roberval in un opuscolo intitolato *Admiranda de Vacuo* (Varsavia, 1647): cfr. Waard (124-126). Per l'accusa di Pascal, cfr. la lettera a M. de Ribeyre, 12 luglio 1651, in Pascal (1998, vol. i, pp. 445-446).

⁸⁹ Cfr. Pascal (1998, vol. i, 1079-1080) e *Id.* (1964-1992, vol. ii, 494-495).

⁹⁰ Cfr. Mazauric (2009).

⁹¹ Cfr. Pascal (1998, vol. i, pp. 529-530).

⁹² Cfr. Pascal (1962-1994, vol. ii, pp. 424-426)

⁹³ AT v 99-100; Pascal (1962-1994, vol. ii, pp. 479-482, in particolare p. 481).

⁹⁴ Pressappoco corrispondenti all'altezza di diciotto braccia stabilita da Galileo.

⁹⁵ Entrare nel dettaglio delle concezioni teologiche, filosofiche ed epistemologiche di Pascal esula dallo scopo di questa introduzione, ma è tuttavia interessante notare che, come molti suoi contemporanei, Pascal ritiene che la natura umana sia intrinsecamente corrotta e che quindi affidarsi unicamente al criterio dell'evidenza, come aveva fatto Descartes, significava accedere non alla verità, ma all'illusione della verità. Riflessioni che troveranno espressione compiuta in *De l'esprit géométrique*.

⁹⁶ Cfr. *infra*, par., cap.,

⁹⁷ Cfr. Pascal (1998, vol. i, pp. 394-395).

⁹⁸ Cfr. Pascal (1964-1992, vol. ii, pp. 584-602, 633-639).

⁹⁹ Cfr. Pascal (1998, vol. i, pp. 396-425) e Mersenne (1945-1988, vol. xvi, pp. 127-130). Per ulteriori approfondimenti sulla polemica, cfr. Humbert (c1947, pp. 89-96).

¹⁰⁰ Cfr. *infra*, par., cap.

¹⁰¹ Su questo esperimento suggerito dall'aristotelico Carlo Rinaldini con l'intento di confermare la teoria aristotelica, cfr. Galluzzi (1981).

¹⁰² Cfr. Mersenne a Huygens, 4 gennaio 1648, in Mersenne (1945-1988, vol. xvi, pp. 11, 12-13).

¹⁰³ Dello scambio rimane soltanto la lettera di Le Tenneur: Cfr. Le Tenneur a Mersenne, 16 gennaio 1648, in Mersenne (1945-1988, vol. xvi, pp. 55, 56 n1). Per le *Reflexiones*, cfr. Pascal (1964-1992, vol. ii, pp. 483-489), mentre per la seconda *Narratio* su cui ritorneremo per l'esperimento del vuoto nel vuoto, *ivi*, pp. 603-611, in particolare la nota introduttiva, pp. 603-604.

¹⁰⁴ Com'è noto, intorno a questo documento si accese una disputa iniziata nel 1906 con la pubblicazione da parte di Félix Mathieu di alcuni saggi sulla *Revue de Paris*. Mathieu sosteneva che la lettera di Pascal fosse un falso con cui quest'ultimo voleva attribuirsi la paternità dell'ipotesi della pressione atmosferica e delle principali esperienze necessarie per confermarla: l'esperimento del vuoto nel vuoto, che Mathieu attribuiva a Auzoult, e l'idea di ripetere l'esperimento barometrico della montagna, che originariamente era stata formulata da Descartes. Diversi anni dopo Jean Mesnard dimostrò in modo piuttosto convincente la faziosità delle tesi di Mathieu, mostrando come invece Pascal non cercò mai di arrogarsi il diritto di primo inventore dell'ipotesi della pressione. Egli fu tuttavia il primo a dimostrarla sperimentalmente, proprio con l'esperienza del Puy de Dôme, che Pascal comunicò al cognato Périer effettivamente alla metà di novembre del 1647. Quanto alla priorità di Descartes, Mesnard argomentò che molto probabilmente i due avevano concepito l'idea nello stesso periodo, ossia durante la fine dell'estate-autunno 1647. Cfr. Pascal (1964-1992, vol. ii, pp. 655-669). Infine, nel 1964 Bernard Rochot dimostrò che la lettera era stata effettivamente riscritta nell'ottobre del 1648: cfr. Pascal (1998, vol. i, p. 1090 e *infra*). Per una sintesi della disputa, limitatamente all'ipotesi della pressione e al debito di Pascal verso Torricelli, Mazauric (2009).

¹⁰⁵ Cfr. Descartes a Carcavy, 11 giugno e 17 agosto 1649, AT v, pp. 366, 391.

¹⁰⁶ Cfr. Pascal (1964-1992, vol. ii pp. 633-639, 763, 767-771). La tesi di Pecquet fu ripresa anche da Mathieu per negare a Pascal la paternità anche di questo esperimento.

¹⁰⁷ Cfr. Pascal (1964-1992, vol. ii, pp. 603-604).

¹⁰⁸ Mersenne (1945-1988, vol. xvi, p. 230). Mersenne aveva comunicato l'esperimento della vescica anche a Baliani: cfr. *ivi*, pp. 242-243.

¹⁰⁹ Costantijn Huygens a Mersenne, 3 maggio 1648, *ivi*, p. 296.

¹¹⁰ Cfr. Hobbes a Mersenne, 25 maggio 1648, *ivi*, p. 334. Per la lettera precedente, *ivi*, p. 107.

¹¹¹ Cfr. Pascal (1964-1992, vol. ii, p. 933).

¹¹² *Ivi*, pp. 722-727.

¹¹³ *Ivi*, pp. 777-785, 787-798.

¹¹⁴ *Ivi*, pp. 804-813.

¹¹⁵ Su questo punto, cfr. la nota introduttiva di Le Guern in Pascal (1998, vol. i, pp. 1102-1103).

¹¹⁶ Cfr. Humbert (1947c, pp. 132-136).

¹¹⁷ Cfr. Birch (1756-1757, vol. I, pp. 368, 401), rispettivamente gli incontri del 6/16 gennaio e del 23 marzo/2 aprile 1664.

¹¹⁸ Si tratta di *Hydrostatical Paradoxes, Made out by New Experiments, (For the Most Part Physical and Easie)*, pubblicati a Oxford nel 1666. Cfr. Boyle (1999-2000, vol. 5, in particolare pp. 213-8, 263-9). Sul contenuto dell'opera, oggetto tra l'altro delle critiche di Henry More, cfr. Ricciardo (2016, pp. 308 sg.)

¹¹⁹ Cfr. C.J. Scriba, *The Autobiography of John Wallis, F.R.S.*, «Notes and Records of the Royal Society of London» 25 (1970), pp. 17-46, 39-40. Sul Gresham College e il gruppo del 1645, cfr. C. Webster, *La Grande Instaurazione*, pp. 67-74.

¹²⁰ Sul circolo di Hartlib, cfr. C. Webster, *La Grande Instaurazione: scienza e riforma sociale nella rivoluzione puritana*, tr. it. a cura di P. Corsi, Feltrinelli, Milano 1980. (ed. or. *The Great Instauration: Science, Medicine and Reform 1626-60*, Duckworth, London 1975).

¹²¹ Haak a Mersenne, 24 marzo/3 aprile 1648; 3/13 luglio 1648 in Mersenne (1945-1988, vol. XVI, pp. 203, 413). Sull'introduzione dell'esperimento torricelliano in Inghilterra, cfr. Webster (1965, pp. 455-8). Sul circolo di Hartlib e la nuova filosofia a Londra, Id. (1980, trad. it., cap. II *et passim*).

¹²² Cfr. P. Anstey, *Experimental versus Speculative Natural Philosophy*, in Id. and J.A. Schuster (ed.), *The Science of Nature in the Seventeenth Century*, Springer, Dordrecht 2005, pp. 215-242, in particolare pp. 217-218. Hartlib usa l'espressione «Experimental philosophy» parlando degli interessi per la conoscenza sperimentale e le invenzioni meccaniche dell'allora arcivescovo di Canterbury William Juxon (1582-1663): cfr. HP 29/3/37B.

¹²³ Cfr. Haak a Mersenne, 24 marzo/3 aprile 1648, in Mersenne (1945-1988, vol. XVI, p. 203). Cfr. anche Haak a Mersenne, 3/13 luglio 1648, *ivi*, p. 413.

¹²⁴ Sul circolo di Newcastle, cfr. J. Jacquot, *Sir Charles Cavendish and his learned friends*, «Annals of Science», 1-2, 8 (1952), pp. 13-27, 175-91; R.H. Kargon, *L'atomismo in Inghilterra da Harriot a Newton*, Il Mulino, Bologna 1983 (ed. or. *Atomism in England from Harriot to Newton*, Clarendon Press, Oxford 1966), pp. 89-105.

¹²⁵ Cfr. J. Aubrey, *Brief Lives*, cit., vol. 2, p. 140; cfr. anche la vita di Hobbes, in Id., *Brief Lives*, cit., vol. 1, p. 337. Sul ruolo di Petty nella diffusione del meccanicismo e dell'atomismo cfr. R.H. Kargon, *L'atomismo in Inghilterra da Harriot a Newton*, cit., pp. 97-98.

¹²⁶ Hartlib a Boyle, 9 maggio 1648, *Correspondence*, vol. 1, p. 66. Nell'estratto della missiva vengono ricordati il libretto sulla filosofia di Epicuro pubblicato nel 1649 in appendice alle *Animadversiones in decimum librum Diogenis Laertii* e l'uscita, l'anno precedente, del *De vita et moribus Epicuri libri octo* (1647).

¹²⁷ *Ibidem*.

¹²⁸ Cfr. W. Charleton, *Physiologia Epicuro-Gassendo-Charltoniana*, cit., p. 35. Cfr. gli estratti della corrispondenza Mersenne-Haak e le note manoscritte di John Spence in *Dr. Pascall's Rare Experiments... Tryed and Augmented by Henry Power 1653 May 3^d* riportati in W.E.K. Middleton, *The History of the Barometer*, cit., pp. 56, 59. Non è chiaro dove Haak esegui o vide gli esperimenti, anche se è ragionevole supporre che fu all'interno della cerchia di Hartlib. In quel periodo, infatti, anche Hartlib era in contatto epistolare con Mersenne. Cfr., per esempio, Mersenne a Hartlib, 25 giugno 1648, *Correspondance du p. Marin Mersenne: religieux minime*, cit., vol. XVI, pp. 374-375.

¹²⁹ Cfr. Boyle a Hartlib, 19/29 marzo e 8/18 aprile 1647, in Boyle (2000, vol. 1, pp. 53, 55).

¹³⁰ Cfr. R. Boyle, *Some Considerations touching the Usefulness of Experimental Natural Philosophy...* (Oxford, 1663), in Boyle (1999-2000, vol. 3, pp. 246-7); Frank (1983, trad. it., pp. 212 sg.)

¹³¹ Cfr. Sharrock a Boyle, 26 gennaio 1660, *Correspondence*, vol. 1, pp. 398-400. Una seconda edizione fu pubblicata nel 1662. *Works*, vol. 1, pp. cxxix-cxxxiv. Sharrock partecipava alle riunioni scientifiche a casa di Boyle in Deep Hall; interessato soprattutto alle indagini botaniche, nel 1660 pubblicò, con il sostegno di Boyle una sorta di manuale intitolato *The History of Improvement of Vegetables*. Esso conteneva istruzioni per la germinazione e la coltivazione di una varietà di piante. Sharrock si occupò anche di diritto naturale, argomento su cui scrisse un'opera in latino contro la politica e l'etica hobbesiane. Cfr. A. Arber, *Robert Sharrock (1630-1684): a precursor of Nehemiah Grew (1641-1712) and an exponent of "natural law" in the plant world*, «Isis» 51 (1960), pp. 3-8; A. McConnel, *DNB*, *ad vocem*.

¹³² T. Sprat, *The History of the Royal Society (1667)*, ed. by J.I. Cope and H.W. Jones, Washington University Press & Routledge and Kegan Paul, St. Louis and London 1966².

¹³³ Hartlib a Boyle, 7 gennaio 1658, *Correspondence*, vol. 1, p. 248.

¹³⁴ Per i commenti di Hooke sulla vicenda della costruzione della pompa ad aria, cfr. R. Waller, *The life of Dr. Robert Hooke*, in R. Hooke, *The posthumous Works*, edited by R. Waller, London 1705, p. III. Cfr. *Works*, vol. 1, pp. 158-159.

¹³⁵ L'accademia di Montmor (1657-1664) nacque per iniziativa dei membri appartenenti al circolo di Gassendi a Parigi e grazie al patrocinio del cartesiano e amico di Mersenne Henri-Louis Habert de Montmor (1600 ca.-1664). Sulle sue attività e i rapporti con il mondo scientifico inglese cfr. H. Brown, *Scientific Organizations in Seventeenth Century France (1620-1680)*, Russell & Russell, New York 1967, capp. IV-V.

¹³⁶ Fu proprio a Charles Boyle (1639-1694), visconte di Dungarvan, che Boyle dedicò i *New Experiments*, probabilmente in ragione dell'interesse del giovane per gli esperimenti pneumatici. Cfr. *Works*, vol. 1, p. 157, dove rivolgendosi al nipote Boyle ricorda una lettera che questi gli aveva inviato da Parigi e le «lettere di altre persone d'ingegno a Parigi» che lo avevano informato «che li diversi virtuosi erano molto impegnati nell'esaminare il ruolo dell'aria nell'impedire la caduta del mercurio nel famoso esperimento riguardante il vuoto».

¹³⁷ Cfr. rispettivamente Hartlib a Boyle, 10 maggio 1659, *Correspondence*, vol. I, p. 351 e Oldenburg a Boyle, 23 luglio/2 agosto 1659, *Ivi*, p. 362. Cfr. anche Hartlib a Boyle, 15 novembre 1659 e 26 novembre 1659, rispettivamente in *Ivi*, pp. 384-388. Anche l'astronomo Walter Pope (1628 ca.-1714), che allora era a Parigi, inviò a Boyle notizie sugli esperimenti dell'accademia di Montmor: cfr. Pope a Boyle, 10 settembre 1659, *Ivi*, pp. 362-365.

¹³⁸ Cfr. Boyle a Hartlib, 3 novembre 1659, *Correspondence*, vol. I, p. 382.

¹³⁹ Cfr. *Works*, vol. I, pp. 157, 160-162; S. Shapin, - S. Schaffer, *Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*, cit., pp. 26-30, 227. Come sottolineano i due studiosi, fino al XIX secolo si è creduto che la pompa ad aria progettata da Boyle e Hooke fosse l'esemplare in possesso della Royal Society. In realtà nessuna delle macchine utilizzate da Boyle è giunta fino a noi: gli esemplari più antichi sono quelli di Francis Hauksbee "the elder" (1666 ca.-1713) e risalgono agli inizi del Settecento. Cfr. anche H. Guerlac, *CDSB, ad vocem*.

¹⁴⁰ Cfr. Galileo a Baliani, marzo 1614, OG XII, pp. 20, 34-36. Per determinare quella proporzione Galileo prese due fiaschi uniti da un ditale di cuoio provvisto di un'animella al centro. In un fiasco immise aria con l'aiuto di uno schizzatoio, nell'altro una certa quantità d'acqua. Pesando i due fiaschi apparve che tolto il peso di questi, l'acqua pesava 460 volte più dell'aria.

¹⁴¹ Cfr. Pecquet (1651, p. 58). Per la descrizione dell'esperimento con la vescica, *ivi*, pp. 50-4.

¹⁴² Per la ricezione della terminologia e delle ricerche di Pecquet in ambito inglese cfr. Webster (1965, pp. 453-6 *et passim*).

¹⁴³ Cfr. C. Webster, op. cit., pp. 442-463, 460.

¹⁴⁴ *Dialogus Physicus*, OL 4, pp. 250, 276-77.

¹⁴⁵ *Works*, vol. I, p. 166.

¹⁴⁶ *Ivi*, p. 146.

¹⁴⁷ *Ivi*, p. 169.

¹⁴⁸ *Ivi*, pp. 193-194. Come ha rilevato Webster, questo esperimento ebbe un ruolo fondamentale nella formulazione della legge che porta il nome di Boyle, poiché permetteva di intuire l'esistenza di una relazione tra elasticità e volume dell'aria: C. Webster, *The Discovery of Boyle's Law, and the Concept of the Elasticity in the Seventeenth Century*, cit., pp. 467-468.

¹⁴⁹ *Works*, vol. I, p. 197.

¹⁵⁰ *Ivi*, p. 198.