

EXPERIENȚELE LUI BOYLE ȘI MARIOTTE DIN FIZICA GAZELOR

Andrei GONȚA, Ilie TÂRNOVAN

Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat: Se descriu experiențele istorice ale lui Robert Boyle și Edmé Mariotte, care au dus la descoperirea primei legi a gazelor. Se sugerează ideea precum că folosirea pompei de aer pentru producerea vidului, dar mai ales efortul fizic care trebuia depus de om la pomparea aerului, l-a îndemnat pe Boyle să studieze comportarea aerului rarefiat, cât și comprimat. Spre deosebire de Boyle, Mariotte a ajuns la această lege, studiind fenomenul de condensare a aerului atmosferic. Experiențele au fost bazate pe măsurarea presiunii atmosferice. Legea Boyle-Mariotte este exactă pentru gazul ideal, dar poate fi aplicată cu o anumită aproximație și gazelor reale.

Cuvinte cheie: lege, Boyle, Mariotte, aer, mercur, tub, elasticitate, compresibilitate presiune, volum

Introducere. Formularea problemei

Pe la mijlocul secolului al XVII-lea se știa foarte puțin despre proprietățile fizico-mecanice ale aerului, considerat element canonic, alături de foc, apă și pământ. Până atunci, fusese descoperite doar greutatea aerului (Galileo Galilei, 1612), presiunea atmosferică și vidul (Evangelista Torricelli, 1643), și inventată pompa de aer (Otto von Guericke, 1654). Următorul pas înainte în domeniul dezvoltării științelor naturii l-au făcut fizicienii Robert Boyle (1627-1691), în Anglia, și Edmé Mariotte (1620-1684), în Franța, care au studiat experimental dependența dintre presiunea gazului și volumul său. Ei au descoperit prima dintre legile științifice, care depășesc cadrul mecanicii elementare. Legea se referă la compresibilitatea (elasticitatea) gazelor și se numește *legea lui Boyle*, în țările anglo-saxone, și *legea Boyle-Mariotte*, în țările francofone. La noi ea este cunoscută sub numele de *legea Boyle-Mariotte*.

Cu toate că legii Boyle-Mariotte i-au fost consacrate numeroase studii, totuși actul de descoperire al acestei legi continuă să impresioneze și să prezinte în sine un interes destul de puternic.

Experiențele lui Robert Boyle

În 1657, Robert Boyle află de experimentul emisferelor al lui Otto von Guericke (1602-1686 și cu ajutorul lui Robert Hooke (1635-1703), care era un mecanic ingenios, construiește între anii 1658-1659 un model îmbunătățit al pompei de aer, pe care-o aplică la studierea proprietăților fizico-mecanice ale aerului atmosferic. Peste un an își publică rezultatele cercetărilor sub titlul „*New experiments physico-mechanical, touching the spring of the air and its effects*”, adică „*Noi experimente fizico-mecanice privind arcul aerului și efectele sale*” [1]. Pe atunci fenomenele naturale erau puțin cunoscute și de aceea experiențele descrise de el cu suficientă exactitate și minuțiozitate au jucat un rol important în dezvoltarea fizicii și chimiei chiar și dacă nu au fost generalizate și explicate întotdeauna corect. El a descoperit că aerul este un mediu *elastic*, adică rezistent la comprimare, care se extinde pentru a ocupa tot spațiul disponibil. Pentru a clarifica noile proprietăți ale aerului atmosferic, elasticitatea și compresibilitatea, el deseori compara acest fluid cu un burete, care își putea modifica dimensiunile și implicit volumul sub efectul forței exterioare. Tot el a sugerat ideea că greutatea corpurilor se modifică în funcție de portanța atmosferei, comparând straturile inferioare ale atmosferei cu arcuri mici, care sunt comprimate de greutatea straturilor superioare. Repetând experiențele lui Torricelli și Pascale cu privire la presiunea atmosferică, Boyle a constatat că aerul conținut într-un vas poate echilibra o coloană de mercur de 28 țoli înălțime, ceea ce este echivalent cu 711,2 mm. Cu curajul omului de știință el a dat explicația reală a acestui fenomen: „*masa de aer din vas a avut, în momentul în care a fost închis, aceeași densitate și aceeași elasticitate ca și aerul atmosferic*” [1].

Lucrarea lui Boyle „*New experiments physico-mechanical, touching the spring of the air and its effects*” a fost întâmpinată cu ostilitate de comunitatea științifică de atunci. Printre criticii ideilor sale îl găsim pe cunoscutul filozof-materialist Thomas Hobbes (1588-1679), dar mai ales pe profesorul de fizică și matematică din Liège Francis Line (1595-1675). Ultimul nu recunoștea că aerul, care este o substanță ușoară și fluidă, ar fi capabil să echilibreze greutatea coloanei de mercur din tubul barometric, deși Evangelista Torricelli (1608-1647) demonstrase deja că cauza acestui fenomen este presiunea atmosferică. Pe atunci afirmația dogmatică a lui Aristotel că „*apa se ridică după pistonul pompei datorită sentimentului de frică al naturii față de vid*” („*horror vacui*”) era ridicată de biserică la rang de canon, care nu putea fi contrazis de nimeni. În opinia scolasticilor, spațiul gol al tuburilor ar trebui să se umple cu mercur, apă și alte lichide.

Când s-a dovedit că apa în tub urcă după piston până la o înălțime de numai 18 coate sau 33 de picioare, genialul om de știință florentin *Galileo Galilei* (1564–1642) a admis ipoteza, conform căreia „*natura nu are oroare de vid decât numai până la înălțimea de 18 coate*” [2], ceea ce înseamnă că „*forța de oroare a vidului*” este limitată. Line a explicat menținerea mercurului în tub datorită existenței unor fire invizibile, numite de el *funiculus*, pe care le-ar fi simțit atunci când închidea cu degetul partea de sus a tubului, umplut cu mercur și inversat într-un vas cu mercur; mercurul din tubul suficient de lung cobora, dar de fiecare dată se oprea la o anumită înălțime. Evident, explicația lui Line nu l-a mulțumit pe Boyle, determinându-l să efectueze între anii 1660-1661 noi experiențe, pe care le-a descris în anexa „*A defence of the authors explication of the experiments, against the objections of Franciscus Linus and Thomas Hobbes*” („*O apărare a explicațiilor autorilor despre experimente, împotriva obiecțiilor lui Francis Line și Thomas Hobbes*”) a lucrării „*New experiments physico-mechanical, touching the spring of the air and its effects*”, reeditată în anul 1662 [1]. Pentru a demonstra capacitatea aerului de a opune rezistență, Boyle a folosit un tub cilindric în formă de J, închis la brațul scurt, construit de Robert Hooke (fig. 1). Atunci când în brațul lung se turna mercur, acesta comprima aerul din brațul scurt cu atât mai consistent, cu cât mai mult mercur se turna. Altfel spus, dacă mercurul din brațul scurt era la nivelul AB, iar mercurul din brațul lung la nivelul CD, atunci elasticitatea aerului comprimat era de așa mărime încât putea să echilibreze presiunea coloanei de mercur conținută între cele două nivele. Astfel, se demonstra că coloana de mercur se menține în barometru datorită presiunii aerului atmosferic. Turnând în brațul lung al tubului în formă de J cantități de mercur din ce în ce mai mari, Boyle nota înălțimile coloanei de mercur și volumele corespunzătoare de aer comprimat, fără să atragă atenția la valorile rapoartelor dintre ele. Elevul său Richard Townley, studiind jurnalul de experiențe, a observat că volumul ocupat de aer se află în raport invers cu presiunea exercitată asupra lui. Atunci când mercurul în cele două brațe ale barometrului a fost la aceeași înălțime, aerul ocupând un spațiu de 12 țoli lungime, și în brațul lung s-a turnat o cantitate de mercur astfel încât aerul să ocupe un spațiu de numai 6 țoli lungime, s-a constatat că înălțimea coloanei de mercur a fost de 29 țoli, adică presiunea totală fiind de 29x2 țoli, ceea ce înseamnă că volumul ocupat de aer s-a redus de două ori, iar elasticitatea lui s-a mărit tot de atâtea ori. În așa fel, a fost descoperită prima lege a fizicii gazelor.

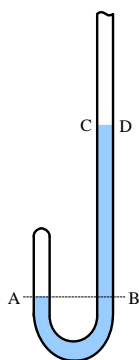


Figura 1.
Barometru în formă de J.

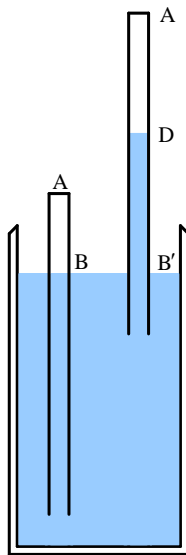


Figura 2. Barometru în formă de I.

Repetând experimentul de mai multe ori și folosind diferite metodici, Boyle a demonstrat că această lege este valabilă și în cazul majorării volumului de aer. În acest scop, el a folosit un vas cilindric umplut cu mercur, în care scufunda un tub cilindric în formă de I, deschis la ambele extremități, în așa fel ca deasupra mercurului pătruns în tub să rămână un spațiu AB de 1 țol lungime (fig. 2). După aceasta, închidea ermetic extremitatea A și ridica tubul pentru ca volumul AB să crească, devenind în final volumul AD – de două ori mai mare decât cel inițial, în timp ce mercurul se ridică la înălțimea B'D=29³/₄ țoli, care era practic de două mai mică decât înălțimea inițială a mercurului în barometru. Era evident că aerul conținut în volumul AD nu avea elasticitatea suficientă pentru a acționa asupra suprafeței D cu aceeași forță cum acționase anterior asupra suprafeței B. Diferența dintre elasticitatea aerului în cele două poziții ale tubului are drept măsură coloana DB' cu lungimea 15³/₈ țoli. Elasticitatea aerului în volumul dublat AD este 29³/₄–15³/₈=14³/₈ țoli, adică aproape jumătate din valoarea precedentă. Dacă tubul s-ar ridica într-atât, încât volumul AD să corespundă unei lungimi de 10 țoli, atunci înălțimea coloanei de mercur DB' s-ar fi dovedit egală cu 26³/₄ țoli, în timp ce elasticitatea aerului a măsurat 29³/₄–26³/₄=3 țoli, ceea ce constituie a zecea parte din elasticitatea inițială. În așa fel, Boyle a descoperit că, la temperatură constantă, produsul dintre presiunea și volumul unei anumite mase de aer este constant, denumind-o *elasticitatea aerului*. A fost prima dintre legile științifice, care depășesc cadrul mecanicii elementare.

Ipoteza lui Power

Tot de la Boyle aflăm că legea care-i poartă astăzi numele îi era cunoscută după lucrarea „*Experimental philosophy, in three books ...*” („*Filozofia experimentală, în trei cărți*”) a lui Henry Power [3]. Într-adevăr, în 1661, Power enunță evaziv o ipoteză, potrivit căreia dacă se cunoaște volumul V_1 („Ayr”) al unei cantități date de aer la presiunea p_1 („standardul Mercurial”, adică presiunea atmosferică la altitudine joasă), atunci se poate prezice volumul V_2 („Ayr dilatate”) al aceleiași cantități de aer la presiunea p_2 („complementul Mercurial”, adică presiunea atmosferică la o altitudine mai mare) cu ajutorul unei proporții, deoarece

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (1)$$

Dar Power nu s-a gândit să verifice experimental ipoteza pe care o înaintase.

Experiențele lui Mariotte

Fiziicianul francez *Edmé Mariotte* (1620-1684) a descoperit aceeași lege independent de Boyle în anul 1676 [4]. În lucrarea „*De la nature de l'air*”, adică „*Natura aerului*”, publicată la Paris în anul 1676, el descrie mai multe experimente efectuate, în care a studiat comportarea aerului și anume, dacă acesta se condensează exact în funcție de proporția greutateașilor cu care este încărcat sau dacă fenomenul de condensare se supune altor legi și proporții. Altfel spus, Mariotte a studiat pe cale experimentală influența presiunii asupra volumului ocupat de aer.

În experimentele sale, Mariotte, ca și Boyle, a folosit un barometru cu mercur. Pentru a măsura presiunea atmosferică H , el a repetat mai întâi experimentul lui Torricelli, folosind un tub cilindric în formă de I, închis la o singură extremitate (fig. 3). Ca unitate de lungime, el a folosit țolul (degetul francez), numit în limba franceză „pouce” și notat cu simbolul po . Pe vremea sa $1\ po$ era echivalent cu $1\ țol$ englezesc, adică cu 25,4 mm. Presiunea atmosferică H , găsită prin măsurări, a fost de 28 po coloană de mercur sau 711,2 mm.

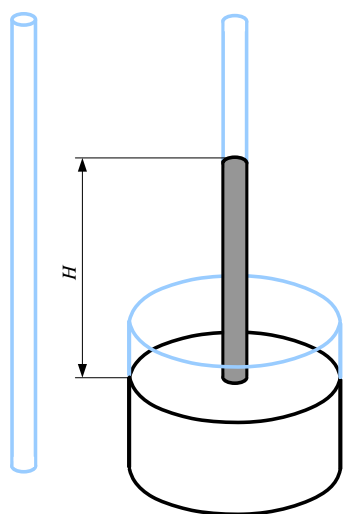


Figura 3. Măsurarea presiunii atmosferice.

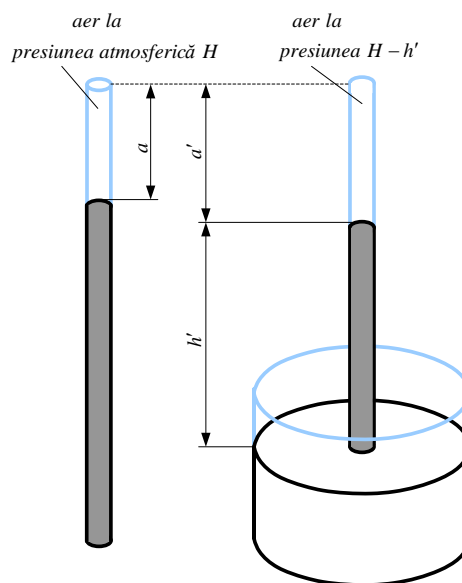


Figura 4. Experiențele lui Mariotte.

După ce s-a încredințat că presiunea atmosferică a fost măsurată corect, Mariotte a aplicat degetul peste capătul deschis și a inversat tubul cu 180° , scufundându-l cu capătul deschis într-un rezervor cu mercur (fig. 4). El a observat că nivelul mercurului în tubul inversat a scăzut, iar aerul din interiorul lui s-a extins. Repetând experimentul de mai multe ori, el a constatat că de fiecare dată raportul dintre înălțimea coloanei de aer extins după inversarea tubului barometric (a') și înălțimea coloanei de aer aflată deasupra mercurului până la inversarea tubului (a) a fost egal cu raportul dintre înălțimea coloanei de mercur corespunzătoare presiunii atmosferice (H) și înălțimea barometrică minus înălțimea mercurului din barometru ($H-h'$), determinându-l să formuleze următoarea „lege a naturii”: *aerul se condensează proporțional cu greutatea cu care este încărcat*. Astfel,

$$a'/a = H/(H-h') \text{ sau } Ha = (H-h')a'. \quad (2)$$

Dar relația obținută de Mariotte nu prea este înțeleasă de contemporani. Pentru a înlătura acest inconvenient, vom aduce relația lui Mariotte la o formă mai acceptată în fizica de astăzi și anume vom exprima înălțimile a și a' prin volumele ocupate de aer până și după inversarea tubului, obținând

$$a = V_1/A \text{ și } a' = V_2/A, \quad (3)$$

unde A este aria secțiunii transversale a tubului cilindric. La fel exprimăm înălțimile h și h' ale coloanei de mercur prin presiunile exercitate p_1 și p_2 , folosind ecuația de bază a hidrostatiei,

$$H = p_1/\rho g \text{ și } H-h' = p_2/\rho g. \quad (4)$$

Prin substituția relațiilor (3) și (4) în a doua ecuație (2), rezultă $p_1V_1 = p_2V_2$.

După descrierea experiențelor lui Mariotte și analiza lor, în mod firesc apare întrebarea: știa oare Mariotte de experiențele lui Boyle? Un răspuns afirmativ la această întrebare nu se poate da, cu toate că Mariotte era în relații amicale cu mulți oameni de știință englezi încă din anul 1668. Datorită lui Mariotte legea devine larg cunoscută în Europa continentală. Tot el a mai descoperit că volumul de aer variază cu temperatura. Tubul din figura 1 a fost numit mult timp *tubul lui Mariotte*, iar legea descoperită de el *legea lui Mariotte*, și numai de la un timp s-a numit corect *legea Boyle-Mariotte*. Mariotte și-a făcut un nume în fizica gazelor anume prin lucrările sale și de aceea este greu de bănuț de plagiat. Istoria fizicii arată că multe legi foarte importante descoperite într-o țară, puteau să rămână timp îndelungat necunoscute în ale țării. Probabil că această teză este mai aproape de adevăr.

Domeniul de aplicabilitate al legii Boyle-Mariotte

Cât de banal nu ar părea, dar primul care a pus sub semnul întrebării justetea legii Boyle-Mariotte a fost chiar Boyle. De aceea, după descoperirea ei, au fost efectuate un șir de studii experimentale, în care s-a urmărit, în principal, determinarea domeniului de aplicabilitate al acesteia. Dar numai în anii 1840-1842 au apărut primele indicații cu privire la multiplele abateri de la această lege [5, 6]. Astfel s-a demonstrat că legea Boyle-Mariotte este riguros valabilă numai pentru gazul ideal, dar poate fi aplicată cu suficientă exactitate și gazelor reale, dacă acestea se află la presiuni nu prea mari (peste 7...8 bar).

Concluzii

1. Mariotte a efectuat aceleași experiențe și măsurări, ca și Boyle, numai că cu o precizie mai mare.
2. Această lege, descoperită în anul 1662 de fizicianul englez Robert Boyle și mai târziu, independent de el, de fizicianul francez Edmé Mariotte, prin simplitatea și corectitudinea ei, ocupă un loc de seamă în fizica gazelor, cu toate că studiile ulterioare au arătat existența unor multiple abateri de la ea și că legea însăși se referă la așa-numitul gaz perfect sau ideal.

Bibliografie

1. Boyle, R., New experiments physico-mechanicall, touching the spring of the air, and its effects, 1660. London, Printed by Miles Flesber for Richard Davis, Oxford, 1682, 224 p.
2. Galilei, G., Discorsi e dimostrazione matematiche intorno a due nuove scienze attenenti all meccanica and i movimenti locali. Leida, Appresso gli Elsevirii, 1638, p. 15.
3. Power, H., Experimental philosophy, in three books. London, Printed by T. Roycroft for John Martin and James Allestry, 1663, pp. 126-130.
4. Mariotte, E., De la nature de l'air, in Oeuvres de MR. Mariotte, de l'Académie Royale des Sciences, tome premier. A Leide: Chez Pierre Vandu Aa, 1717, pp. 151-153.
5. Magnus, H. G., Ueber die ausdehnung der gase durch die wärme, Poggendorffs Annalen, 1842, LV, S. 1.
6. Regnault, H. V., Untersuchungen über die ausdehnung der gase, ebend. 1842, LV, S. 391, und 1842, LVII, S. 115 (nach Annales de chimie et de physique 1842, IV, S. 5, und 1842, V, S. 52).