

高等学校教学用书



物质分子运动論

A. K. 提米里亞捷夫著

高等教育出版社

高等学校教学用书



物質分子运动論

A. K. 提米里亞捷夫著

宋承宗 張季達譯

高等教育出版社

本書系根据俄罗斯苏维埃联邦社会主义共和国教育部国立教科书出版社 (Учпедгиз) 出版的提米里亞捷夫 (А. К. Тимирязев) 所著的“物質分子运动論”(Кинетическая теория материи) 1956 年版譯出的。原書經苏联高等教育部审定为大学参考書。

本書共分九章,前五章內容为分子运动論,后四章內容为統計物理。中譯本前五章系由張季达譯出,后四章系由宋承宗譯出。

物 質 分 子 运 动 論

A. K. 提米里亞捷夫 著

宋承宗 張季达 譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 号

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 054 号)

京华印書局印刷 新华書店發行

統一書号 13010·475 開本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 7 $\frac{8}{16}$ 字數 173,000 印數 0001—3,000
1958 年 11 月第 1 版 1958 年 11 月北京第 1 次印刷 定價 (8) 8 角 0.85

第二版原序

1. 本書第一部分的內容,实际上是从分子运动論發展起来的,更确切地講,是从气体分子运动論發展起来的。这是物理学的首要部分,它是在物質的分子結構的假定上系統地建立起来的,而且对于其中每一个被研究的現象,都建立了研究过程的完全一定的圖象和一定的模型。这一部分越来越發展,已經超出了气体理論的界限,而扩展到物質的其他的一些形式。此外,在一系列分子运动論的問題中,也应用了量子力学。

为这学說所研究的物理学領域中的这一部分,同时也可以利用热力学的方法来研究,热力学开始称为热的运动理論,它是从有关热与机械运动相互轉換的問題中發展起来的。热力学也越来越發展,已成為各种不同的物理部門中以能量相互轉換的观点来研究物理过程的学說。

这两种研究方法,一种根据于分子运动論,另一种根据于热力学的描写方法(这方法是以头两个热力学定律和所謂能斯脫定理为基础的),現在都得到了同等的公認。且在物理学的其他一些領域內,我們也同样要与这两个学派發生关系。麦克斯韋、密特克維奇(В. Ф. Миткевич)、湯姆孙和卡斯杰宁(Н. П. Кастерин)的理論是起着电磁場的运动理論的作用。但是按热力学的模型建立起来的公式化的方法,目前在有关电磁的近代学說中占着統治地位。在电磁場学說的領域內,大部分理論家均摒棄与运动理論的方法相类似的方法,但电磁場的近代公式化的描述却很多和唯物主义的哲学相違背。資產階級的理論家作出了这样的断言:虽然場也是某种运动,但其中並沒有物質的負載者!总而言之,只承認是一种

运动,但并没有什么东西在运动着。

2. 問題在于: 科学是否应该仅仅限于單純的描述,或在描述之后給予理論的解釋呢? 当我们認識一些新的事实或新的現象时,那末我們就不能反对对这些現象加以描述。在这种意义下,任何人也不能反对描述。但是描述——这仅是科学研究的第一步。对它应该进一步去探索因果的关系,因为唯物論的哲学“承認自然界中客觀的規律性、客觀因果性、它只是被人的关于秩序規律等等的表象所近似正确地反映着”^①。而如果我們停留于描述, 声言科学不可能比描述前进一步, 那么我們就会陷入不同形式的經驗批判主义的泥坑。

所以,对于描述,甚至是任何过程或現象的形式上的和表觀的描述,假使它只是作为某种新現象的研究过程的第一个阶段,那就不必爭辯了。仅仅当把描述当作一个唯一的研究方法的时候,那才会發生問題;这时,在研究的領域中,由于这种本身的限制,不同形式的經驗批判主义將會跟踪而至。任何学派的經驗批判主义都不承認外界的客觀实在; 它仅承認我的感覺,我的體驗,且認為新的感覺的相互協調和系統化乃是科学的唯一任务,任何以真實世界中所發生的东西为依据的解釋都是不可能的: 因此反对任何解釋,反对从实际建立概念化的模型、复写、攝影等等的激烈言論,这种观点一般說来乃是从比較徹底的唯物主义立場轉变到經驗批判主义的錯誤立場的标志。尚有一种与此有关系的誤会,遺憾得很,也是非常流行的,即認為任何的模型都必須是力学的,似乎不能在某些过程中設想电磁的模型,或其他某种模型。所有的問題在于: 要使模型成为真實的客觀世界的某一部分的复写或攝影。

3. 在这一方面,我們在量子力学的領域中,可以找到由于經

① 列宁著,唯物論与經驗批判論, 182 頁,曹葆华譯, 1950 年,解放社版。

驗批判哲學的錯誤立場而產生的非常顯明的錯誤假定，這種經驗批判哲學被研究量子力學的資產階級的有名理論家頑固地奉行着。從量子力學的誕生開始，經驗批判主義的陰影就跟隨在量子力學發展的後面。例如，下面就是對於 1925 年海森伯所寫的，其中敘述了量子力學最初輪廓的文章^①的簡評：“在這篇著作中，作者企圖尋求量子力學的基础，這種企圖是以在原則上可觀測的各量之間的关系為出發點的”。那麼，我們就要問：在研究自然界的領域中，能夠說出什麼是原則上不可觀測的量呢？

海森伯解釋什麼是他認為在原則上是不可觀測的。下面就是由海森伯的同一篇文章中摘錄出來的話：“這些計算法則（舊量子論的計算法則——作者）是以在原則上不可觀測的量之間的关系作為它的重要組成部分，例如，電子旋轉的位置和時間（繞原子旋轉——作者）就是這樣的量”。“如果我們還繼續期望那些直到現在尚未能被觀測出的量，能在將來為實驗所觀測出來的話，那麼，這些法則就缺乏任何实际的基础”。而且結論說：“在這種情況下，最好是徹底放棄觀察那些直到現在尚未能被觀測出來的量（例如，電子繞原子核旋轉的位置和時間——作者）的希望……”，“而要設法用與經典力學相比擬的方法，只引入能被觀測的各量之間的关系來建造量子力學”。

我們知道，這種被考慮過的計劃已在 1925 年實現了。從量子論的基础中已經拋棄了所有關於電子繞原子核的軌道等問題。

理論給出了一些極好的方法，利用這些方法可以計算“在原則上可觀測的量”——能級、光譜綫的頻率等等。但是理論不可能告訴我們任何關於原子領域內的電子軌道的問題；這在一開始就被當作某種“在原則上不可觀測的”而蓄意取消了。在不可能同時測

^① Zeitschrift f. physik, 1925, 83, 879.

定电子的坐标和冲量以前，蓄意由理論上取消了这个問題，与我們所熟知的以前宏观宇宙的規律比較起来被人認為是“本質上新的微观宇宙的規律性”。但是終归必須指出，我們得到这些“本質上新的規律”的認識，所用的方法是把原子領域内电子旋轉的时间以及电子繞原子核的軌道假定為某种“在原則上不可觀測的量”。曾經有过时候，奧斯特瓦耳德的唯能論不也是建立在确信分子和原子在原則上是“不可觀測”的基础上嗎，而由此又曾得到了什么呢？誰也不能否認量子力学所已达到的一切成就，但也不能盲目相信量子力学已經达到了絕對完善的地步，不能盲目相信直到現在量子力学还没有給出答案的那些問題，就在原則上永远不能得到答案。

在原則上不可觀測的量的“理論”是經受不住任何絲毫批判的。它已為全部的科學历史所推翻了。曾經有过时候，那时大家都說分子、原子和电子在原則上是不可觀測的。但是，例如克魯克斯(Крукс)閃爍鏡、盖革(Гейгер)計數器、威耳孫云室、布朗运动實驗，如果說这些實驗還未能使所有这些“在原則上不可觀測的”量成為可見的話，那么，無論如何，它們却很好地表明了个別的質点和分子运动的行为。干涉儀和望遠鏡联合起来就能够測量星体的直徑，这在以前認為是“在原則上不可達到的”。在近代的电子显微鏡中可以看到蛋白質的分子，誠然，它的分子是很大的，但是要知道，电子显微鏡現在所做到的還遠不及它所能做到的，所以要看到結晶体的空間点陣并不是不可能的。

正因为如此，所以应从我們的一切議論中除去任何提到“在原則上可觀測的量”和“在原則上不可觀測的量”这样的话。

应不应该把全部經典物理看作量子物理的特殊情形呢？当經典物理确是需要量子物理的地方，才用量子物理来补充一下，而不認為量子物理是什么独立自主的东西，不認為全部旧的經典物理

就是量子物理的特殊情形，这样的看法是不是更不正确了呢？

完全同样，我們觉得由闡明吉布斯統計力学的方法开始来研究分子运动論(如同有时所要做的那样)也是不合理的；在这方面，我們觉得跟随着我們科学發展的历史进程来研究，是比较合理的。不合理之处尤其是在热烈地对待吉布斯方法，把它当作經典統計学的唯一方法之后，才大声疾呼地指出有必要把吉布斯所闡述的方法作某些修改。还有一个原因使我在本書的闡述中不專門依靠吉布斯方法。吉布斯方法只能应用于平衡态，而不能应用于非平衡的过程，例如应用于研究內摩擦、热傳导、扩散等現象。而要从討論中把这些对于实际非常重要的部分刪去，未必是可允許的。

因此，我們認為保持原先內容的安排是正确的。我們从偉大的洛莫諾索夫(Ломоносов)所奠定的基础开始，然后轉到克勞修斯(Клаузиус)、麦克斯威和玻耳茲曼(Больцман)的方法，在这之后再对統計力学和量子力学作一簡短的評述。

然后以簡短提示的方式再討論一下这样一些領域，这些領域就其本質來講并不是新的东西，但从 1939 年开始及其后又重新起着很大的作用。这些就是与热扩散相联系的問題，以及与热扩散紧密联系的关于寻找表达分子力与距离之間的关系式的問題。由于所有这些問題与放射性鈾的同位素分离有关，所以在二十世紀 40 年代之初，特別具有首要的意义。有趣得很，有些問題在十九世紀 70 年代就已不被人所研究，而現在又忽然成为迫切的問題了。

最后說，具有杰出天才的，完全被人遺忘的俄国理論家皮罗哥夫(Н. Н. Пирогов)的著作，是在不久以前才被發現的，他从上一世紀 80 年代之初到 1891 年末(即皮罗哥夫逝世的那一年)在气体分子运动論的領域內發表过一系列的論文，就其思想深度來說，这些研究都是很卓越的，而且直到現在几乎还没有任何人知道这些研究。有关于麦克斯韋的分子間速度分布的深刻思想是屬於他的。

他指出,麦克斯韋速度分布定律的一般解釋,嚴格地說,仅适用于無限广延的气体。如果气体被裝在一体积有限的封閉容器中,則麦克斯韋分布的积分范围永远不是随时都可以是 0 和 ∞ 的;一般說来,这范围是有限的。因此,速度的分布往往与麦克斯韋的分布区别很大。在这些情形中,当不能利用一般的麦克斯韋速度分布时,即是当麦克斯韋积分的范围为有限时,速度的分布接近于量子論^①所給出的結果。在皮罗哥夫的著作中有着許多非常卓越的思想,提出了一系列新的有关分子运动論的問題。有許許多多的問題,他都曾經預料过。

例如,在 1904 年出版的紀念玻耳茲曼的文集中,斯莫盧霍夫斯基(Смолуховский)的論文中有有一个公式 $W(n) = \frac{\nu^n}{n!} e^{-\nu}$ ——在平均有 ν 个質点的区域中,我們遇到 n (不等于 ν) 个質点的几率。处处都把这个关系式叫做斯莫盧霍夫斯基公式。其实在斯莫盧霍夫斯基之前十五年,在 1889 年皮罗哥夫就已經發表了这个关系式^②。

在本書中,我們將要援引皮罗哥夫的一些著作,因为这些著作在 1885 年到 1891 年間曾在俄国物理化学学会的著名杂志上刊載过。然而还需要不少時間,这位俄国优秀的物理学家的这些被人遺忘的著作才能被人仔細地加以研究。我們現在可以这样說:就是在現時,这些著作基本上还没有失去它的意义。

① Очерки по истории Физики в России, под. ред. А. К. Тимирязева, Учпедгиз, 1949, Статья А. С. Предводителева, стр. 220—221.

② ЖФХО, XXI, Часть Физическая, 1889, 232.

“如果有一系統,由 N (很大的数目) 个在空間自由运动的質点組成,設想把空間分成 n 个相同而且相等的“小体积”,則在其中任意一个小体积里同时發現 0, 1, 2, 3... 个質点的几率由下式决定:

$$P_0 = e^{-\varepsilon}; P_1 = \varepsilon e^{-\varepsilon}; P_2 = \frac{\varepsilon^2}{1 \times 2} e^{-\varepsilon}; P_3 = \frac{\varepsilon^3}{1 \times 2 \times 3} e^{-\varepsilon}; \dots;$$

式中

$$\varepsilon = \frac{N}{n}.$$

按照斯莫盧霍夫斯基的符号 $\varepsilon = \nu$ 。

目 录

第二版原序	v
第一章 用初等方法导出分子运动論的基本原理	1
§ 1. 物質分子运动論發展史上几个主要的里程碑	1
§ 2. 玻意耳-馬略特定律的初等导出法	4
§ 3. 气体状态的基本定律	5
§ 4. 分子的平均自由程以及与它有关的物理現象	9
§ 5. 热扩散的初等理論、輻射度效应、稀疏气体的滑移現象和溫度躍变的現象	24
§ 6. 范德瓦耳斯方程式的初等导出法	30
第二章 分子間的速度分布	35
§ 7. 麦克斯章速度分布的最簡單的导出法	35
§ 8. 关于平均自由程的补充知識	44
§ 9. 分子間的碰撞对气体压强的值有没有影响?	47
§ 10. 玻耳茲曼所提出的气体对器壁压强值的导出法	49
第三章 分子运动論的基本方程和速度分布函数的較詳細的研究	52
§ 11. 基本方程的导出法	52
§ 12. 碰撞数的确定	56
§ 13. 碰撞时速度是如何改变的	58
§ 14. “正”碰撞和“逆”碰撞	62
§ 15. 基本方程的最簡單解	66
第四章 斯莫盧霍夫斯基(皮罗哥夫)問題	84
§ 16. 皮罗哥夫問題和分子在空間的最可几分布	84
§ 17. 麦克斯章的速度分布是最可几的分布	92
§ 18. 玻耳茲曼H定理	96
§ 19. 嫡与几率	102
第五章 用玻耳茲曼方法解决內摩擦和热傳导問題	106
§ 20. 玻耳茲曼的方法	106
§ 21. 用玻耳茲曼方法解决內摩擦和热傳导問題	108
第六章 統計物理的基础	118
§ 22. 相宇	118
§ 23. 刘伍維定理	121

§ 24. 統計的平衡条件	126
§ 25. 吉布斯相的正則分布和微正則分布	133
第七章 比热的理論	145
§ 26. 比热的經典理論	145
§ 27. 經典理論修正的必要性	149
§ 28. 求得結果的驗證	155
§ 29. 德拜理論的概念	163
第八章 量子統計学的基础	169
§ 30. 費密分布函数的导出法	169
§ 31. 費密函数中兩系数 α 和 β 的意义的解釋	173
§ 32. 費密函数的基本性質	175
§ 33. 簡并的准則	178
§ 34. 金屬中自由电子平均能量的計算	180
§ 35. 玻色-爱因斯坦的統計法	185
第九章 漲落的理論	19
§ 36. 有关漲落的一般概念	190
§ 37. 在不同条件下測定布朗粒子位移的几率	198
§ 38. 回复時間比較精確的定义	209

第一章 用初等方法导出分子运动論的基本原理

§ 1. 物質分子运动論發展史上几个主要的里程碑

建立近代分子运动論的基础，在远古时代就已为人们所知道了。大約在 2300 年以前，古希腊著名的思想家列夫奇普(Левкий)和德謨頡利圖就已經教导人們說：一切我們所知道的各种物質都是由最小的質点——原子構成的，这些原子可以有各种不同的形狀。

近代分子运动論也是以顆粒——原子——構成一切物体的概念为出發点的，而且这些原子处在永恒的运动中，它們在一定的部分彼此交換着运动。只是現在我們不說原子是絕對不可分的。我們知道，原子是由更微小的質点——質子、中子、电子、陽电子、中微子以及一系列其他的質点——構成的；而且無論是那一个有辯証思想的(即使是自發的)研究者都不再坚持原子的这些組成部分是不可分的。但是，在“所采用的”相对的形式下，只要这样理解，就是分成电子、質子等以后的原子不再具有未分的原子^①的性質，不可分性就仍可保留。

① 恩格斯曾經表示过这样的思想：“化学中的新时代是从原子論开始的(所以近代化学的始祖不是拉瓦錫，而是道尔頓)，与此相适应，物理学中的新时代是从分子論开始的(是从运动形态互相轉化的發現开始的，这在形式上虽然不同，但在本質上不过是这一过程的另一方面)。新原子論之与所有已往的原子論不同，是由于它(撇开蠢才不談)不主張物質只是分离的，而承認各个不同阶段的各个分离的部分(以太原子、化学原子、質量、天体)是各种不同的关节点，这些关节点决定着一般物質的各种不同的質的存在形式……”(見恩格斯著：自然辯証法，248 頁，曹葆华等譯，1955 年，人民出版社版)。

德謨頡利圖和列夫奇普的这种思想,在其后一世紀(約在2200年以前)的伊壁鳩魯那兒以及200年后的琉克利喜阿的著名的詩韵文“論物的性質”^①中都可以遇到。

出乎人們的意料,仅仅在十八世紀——即在1738年,在伯努利^②(Бернулли)的流体动力学第十冊中,特别是洛莫諾索夫^③在他的建立空气压力理論的實驗中,才把这些光輝的思想变成了近代的物理理論。如果說,伯努利給我們的只是純粹公式化的数学导出法,那么,洛莫諾索夫給我們的在本質上就是近代分子运动論的全部圖象。首先,洛莫諾索夫把运动守恒定律推广到一些热現象中去,因而同时作出了把机械运动守恒定律轉換到能量守恒定律的第一步。洛莫諾索夫对分子間的相互作用,給出了十分明显的和具体的圖象。

洛莫諾索夫用两个在光滑冰面上迅速旋轉的陀螺(即兒童游戏中用鞭子抽动的陀螺)碰撞来闡明这种分子間相互作用的过程。洛莫諾索夫关于分子是“無秩序地”互相碰撞并互相彈开的指示未必不是最重要的;这就是經過一百多年以后,为玻耳茲曼所归納出来的“分子杂乱無章的假說”的預示。因此,洛莫諾索夫乃是分子运动論的真正的奠基人。

但是經過100年,在莫斯科大学創立一百周年的紀念大会上,物理学教授柳比莫夫(Н. А. Любимов)曾經說过:洛莫諾索夫的理論仅具有历史意义,因为大多数物理学家都坚持着热質的理論。

在十九世紀前半期,赫喇帕司(Герпат)和克倫尼希(Кренинг)特别是焦耳(Джоуль)和克勞修斯他們又有过同样的思想。最先系

① Отрывки из Лукреция, см. “Основатели кинетической теории”. Сборник под редакцией А. К. Тимирязева, Москва, ОНТИ, 1937.

② 同上。

③ 同上。

統地闡述气体分子运动論的乃是克劳修斯。那时，虽然洛莫諾索夫在理論上推出了与玻意耳、馬略特(Бойль-Мариотт)定律的偏差。但分子运动論的方法当时还没有能够推广到液态和固态中去。范德瓦耳斯(Ван-дер-Ваальс)于 1872 年在他的“論气态和液态的連續性”的学位論文中詳細地研究了这些偏离，这篇論文是把气体的分子运动論的方法推广到液体的开端。

人們要問：为什么从十九世紀中期起分子运动論才开始迅速地發展起来呢？馬克思的学說給我們回答了這個問題。在資本論第一卷第十三章中，我們可以讀到如下的几句话：“蒸汽机是十七世紀末叶手工制造业时期發明的，但繼續至十八世紀 80 年代初，还不曾引起产业革命。反之，使变革了的蒸汽机成为必要的，宁說是工具机的制造”^①。仅从这时起，蒸汽机才变成了工业革命的工具。而且就从这时起才發生了迫切要求改进蒸汽机的問題。要使这个工作不是盲目的，有时候就必须詳細地研究一种形式的运动轉換为另一种形式运动的过程，特別是研究热轉換为机械运动和机械运动轉換为热的过程。而这些現象就是热力学和分子运动論中所要研究的問題。

改进蒸汽机的企圖乃是促使这領域中的科学研究开展的原因，由近代热力学和分子运动論奠基人例如卡諾(Садн Карно)和克劳修斯^②的十分明显的言論中，我們就可以看出这一点。

热力学和分子运动論通常是用不同的方法来研究同样的一些問題，它們都是从十九世紀中期开始由同样的一些思想家們所研究出来的。同时必須指出，这些思想家們并沒在这兩門知識領域

① 馬克思著資本論第一卷第十三章 451 頁，郭大力、王亞南譯，人民出版社 1953 年北京版。

② Сборник “2-е начало термодинамики”, под редакцией А. К. Тимирязева, ГТТИ, 1934.

之間建立起一道万里長城，如在十九世紀和二十世紀交合点时期所常作的那樣，即使在現時也还有人这样作。实际上，克勞修斯同时是近代热力学和近代分子运动論的奠基人。威廉·湯姆孙[开耳芬(Кельвин)勋爵]也同时在这两个领域中工作过，最后，威拉德·吉布斯把热力学方法推广到物理-化学过程的最广泛领域中，而他同时又是作为热力学理論基础的“統計力学原理”这一本書的作者。

因此，物理思想近代学派的偉大奠基者們不应受到思想狹隘和学究气的責难，而其中有很多却是我們繼承者們的罪过。

§ 2. 玻意耳-馬略特定律的初等导出法

能够近似地解决一系列最复杂的問題乃是分子运动論方法的特点。而且用这种方法所得到的規律性与根据更严密的理論的方法所得到的結果很少有区别。在絕大多数情况下，更严密的理論只是精确地确定乘数的数值。而現象的物理圖象在近似的解答中却已完全显示出来了。正因为如此，所以我們在开始时用这些近

似的計算方法来研究分子运动論是适当的。首先讓我們来研究一下洛莫諾索夫在 1745 年提出的^①玻意耳-馬略特定律的导出法。

設有一个边長为 a 的立方形容器，其中裝有气体(圖 1)。然后設把立方形的边長由 a 減为 $\frac{a}{2}$ ，因而也就減小了气体所占有的体积。显然，原来的体积 V

就由 V 减小成为 $v = \frac{1}{8}V$ ，因为在大立方形 $ABCDEFGH$ 中可以

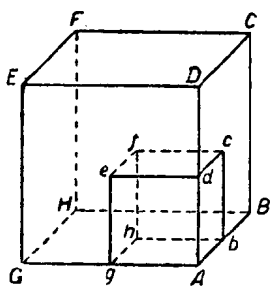


圖 1.

① 在我們的討論中，是用立方容器代替了球形容器。

放八个被減小了的立方形 $Abcdefhg$ 。

如果我們按照分子运动論的基础，以分子与器壁的碰撞來說明气体的压强，那么現在在体积減小的情况下，所有与面 $ABCD$ 碰撞的分子將与为原来面积的 $\frac{1}{4}$ 的面 $Abcd$ 碰撞，因此气体的压强，即在單位時間內作用于單位面积上的冲量和也变为原来的 $\frac{1}{4}$ 。此外，我們考察一下任何一个由器壁 $ABCD$ 飞往器壁 $EFGH$ 并飞回来的分子。当体积减小时，这分子的往返路程縮短一倍，即由 $AG+GA$ 变为 $Ag+gA$ 。因此，如果每个分子保持自己的速度，則与每一器壁碰撞的次数也將增加一倍，因此压强也应该增加一倍。所以，当体积减小时，压强增加并等于 $P=8p$ 。使 $P=8p$ 与 $v=\frac{1}{8}V$ 兩边相乘，我們得到

$$Pv = pV,$$

这就是玻意耳-馬略特定律的表达式。

在这个导出法中，並沒有談到分子間的碰撞問題。但是，完全合理地要問：能不能說每个分子的运动都是由器壁 $ABCD$ 飞到器壁 $GEFH$ 并飞回来呢？因为实际上，每次每个分子在自己的路程上要与其他分子碰撞許多次，因而要改变自己的运动方向。但是，我們將來可以看到，考虑到碰撞并不影响最后的結果。

§ 3. 气体状态的基本定律

現在我們来研究一下气体状态基本定律的导出法。設在一立方形容器中，有一單位体积的气体。假設單位体积中的分子数为 ν 。因为立方形容器每一面所受的压强必須相同，所以平均的講，就我們任意所取的容器的每一面积元來說，分子的碰撞数必須相同。設把所有的分子数 ν 分为三群，每群有 $\frac{\nu}{3}$ 个分子，而且每一群將垂直于立方形容器三对面作来回的运动，就立方形容器來說，

是可以滿足这个条件的。利用这种粗略的圖象，基本上能够导出正确的結果，可以用更严密的計算来檢驗这一点。这种粗略的圖象是由焦耳在十九世紀 40 年代最初提出的。

設分子运动的速度为 u 。在立方形容器任一面的面积元 σ (圖 2) 上，作一长度为 udt (与面垂直) 的柱形。这柱形的体积为 σudt ，位于这柱形內沿柱形軸綫方向飞行的分子数为 $\frac{\nu}{3}\sigma udt$ 。其中半数的分子飞向面积元 σ ，另外的半数分子則向相反的方向飞去。因为在开始时刻位于相对底面 σudt 上的那些分子，在時間 dt 內，都能飞到器壁的面积元上，因此所有这些飞向面积元的分子，在時間 dt 內都与器壁 σ 相碰撞。如果气体状态不随時間而改变，就是說，它是稳定的，則在任意時間內，碰撞的分子数都是相同的： $\frac{\sigma u \nu}{6} dt$ ①

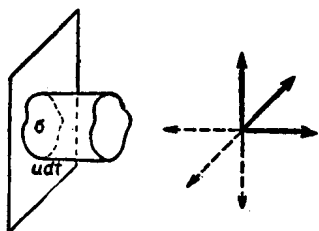


圖 2.

等等，而在單位時間內，与面积元 σ 碰撞的分子数为 $\frac{\sigma u \nu}{6}$ 。如果在器壁与分子之間不發生能量的交换，則分子仍以与向器壁飞行的相同的速度 u 由器壁彈回。在此情況下，分子动量的变化或施于器壁的冲量等于 $2mu$ 。在單位時間內施于器壁 1

平方厘米面积上的冲量和等于 $2mu$ 乘以單位時間內分子的碰撞数，这就等于压强 p 。所以：

$$p = \frac{1}{3} \nu m u^2. \quad (1)$$

公式(1)的严密的导出法只不过給出平均值 $\bar{u}^2$ 以代替 u^2 ，这是因为分子是以不同的速度在运动着。此外，速度的方向可以是任意的，因此，在更严密的导出法中，就不能象剛才我們所作的那样，假

① 利用这种方法，在相当的程度上，我們除去了分子互相碰撞的影响。以后，我們要导出更完全的証明，以証明分子間的互相碰撞并不影响我們的結果。