
Sur la réalisation d'un rayonnement matériel d'origine purement thermique. Cinétique expérimentale

Par L. DUNOYER

[Faculté des Sciences de Paris. — Laboratoire de Mme CURIE.]

Au cours des recherches que j'ai publiées ici même¹ sur les rayons cathodiques que l'on peut obtenir au moyen de cathodes recouvertes de gouttes métalliques très petites (gouttes de métal alcalin en particulier), j'avais remarqué que lorsqu'on distille un métal alcalin dans un vide très soigné, la condensation ne se produit pas toujours conformément au principe de Watt ou de la paroi froide, mais sur certaines parois possédant une situation particulière par rapport à la partie chauffée. Des obstacles convenablement disposés, tels que les électrodes, étaient susceptibles de porter sur la paroi des ombres nettes.

1. *Le Radium*, 7 (1910) 500.

L'étude de ce phénomène m'a conduit à fixer une technique qui permet d'isoler un faisceau de particules matérielles, probablement de molécules, animées de vitesses toutes parallèles entre elles. Ce faisceau réalise, en somme, ce que M. Poincaré a appelé un gaz à une dimension. Ce véritable rayonnement matériel se propage en ligne droite dans le vide et peut donner des ombres parfaitement nettes après un parcours assez long. Je ne connais pas encore les limites de ce parcours mais j'ai pu le réaliser aisément sur une longueur d'une vingtaine de centimètres. L'objet de cette note préliminaire est de décrire le phénomène et d'indiquer les principales directions qu'il semble ouvrir à des recherches expérimentales sur la cinétique des gaz.

1. **Disposition d'une expérience.** — La disposition la meilleure est celle que représente la figure 1. Le tube ABC, en verre de Thuringe, lavé, une fois fini, à l'acide chromique, puis à l'eau distillée et séché, comporte trois

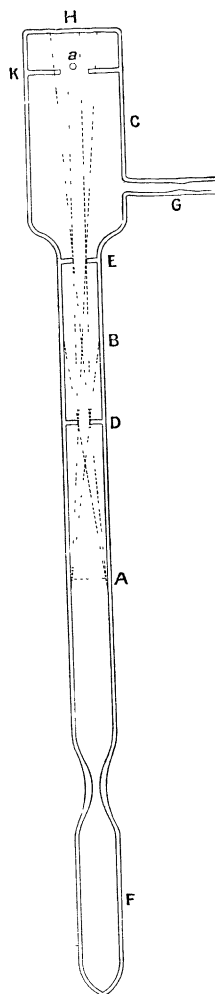


Fig. 1.

compartiments A, B, C séparés par les deux cloisons D et E, qui sont percées de deux petits diaphragmes circulaires, ayant de 2 à 5 millimètres de diamètre. L'extrémité inférieure du tube communique elle-même par un capillaire avec un réservoir F. On peut faire le vide par le tube latéral G. On commence par mettre un peu du corps à volatiliser, déjà suffisamment pur, dans le tube F, ce tube étant ouvert par le bout. On l'étire, puis on soude le tube latéral G sur la canalisation de la pompe à mercure. Il est bon d'intercaler sur cette canalisation un petit tube contenant quelques feuilles d'or pour arrêter les vapeurs de mercure. On fait le vide en chauffant les parois, sauf le tube F, vers 500°, avec un bunsen. Au bout de trois quarts d'heure au plus la jauge de McLeod n'indique plus aucune pression mesurable; la pression est inférieure en tous cas à un vingt millième de millimètre de mercure, si le corps à vaporiser est suffisamment peu volatil à la température ordinaire. On laisse refroidir les parois, puis on chauffe le tube F au moyen d'un petit four électrique, en protégeant les parois du tube A qui doit rester froid. J'ai continué à trouver très pratique les petits fours en verre que j'ai antérieurement décrits (*loc. cit.*) parce qu'ils permettent de voir s'il se produit des dégagements gazeux obligeant à modérer le chauffage, comme c'est de règle avec le sodium à une certaine température. Pendant la distillation on fait continuellement marcher la pompe (pompe Gaëde). On obtient finalement sur les parois inférieures du compartiment A un dépôt suffisamment épais. On scelle alors le capillaire et on enlève le tube F. Il peut être utile de signaler que le verre qui a été bruni fortement par l'attaque d'un métal alcalin devient très fragile quand on le réchauffe. Lorsqu'on distille du

potassium et surtout du sodium, moins volatil, le capillaire est généralement très attaqué. Il faut donc procéder au scellement avec quelque précaution. L'attaque de la paroi interne ne gêne d'ailleurs nullement pour obtenir un scellement parfait.

L'opération précédente fait passer en A un corps pur, susceptible d'être chauffé sans émettre d'autre gaz que sa vapeur. Les parois des compartiments B et C sont parfaitement limpides et ne portent la trace d'aucun dépôt.

On chauffe alors au four électrique le compartiment A ou de préférence, la partie intérieure de ce compartiment. On protège par un écran d'amiante, mis par-dessus le four et traversé par le tube, les compartiments supérieurs, dont les parois restent tout à fait froides jusqu'au niveau du diaphragme D. Si l'on a mis en A du sodium on chauffe par exemple vers 400°. On constate qu'il se forme rapidement sur les parois du compartiment B un dépôt dont l'épaisseur diminue et devient nulle en descendant de E en D. Sur les parois de C on n'observe *aucun* dépôt, sauf à l'extrémité H. On observe là une *tache circulaire à contours très nets*. S'il se trouve un obstacle interposé telle qu'une petite tige de verre *a* traversant le tube, cette tige porte ombre sur la paroi avec une absolue netteté.

2. **Caractères du phénomène.** — Cette expérience, que j'ai répétée un grand nombre de fois en variant la forme des tubes (au lieu de deux diaphragmes on peut remplacer les compartiments A et B par un simple tube de petit diamètre, 3 ou 4 millimètres, soudé sur le tube C; mais la définition du faisceau est moins bonne comme l'expérience et la théorie s'accordent à le montrer), — cette expérience prouve d'abord que la matière en mouvement qui va former le dépôt H ne contourne pas les obstacles, comme le ferait ce qu'on a l'habitude d'appeler un jet de gaz qui formerait des remous derrière eux de manière à ne pas laisser d'espace vide.

De plus il est facile de reconnaître que la propagation de cette matière se fait en ligne droite. Si l'on cherche à faire coïncider en projection l'ombre portée par la tige de verre et cette tige elle-même, on reconnaît que le plan défini par un bord de l'ombre et le contour apparent correspondant de la tige est tangent aux bords des deux diaphragmes D et E. L'expérience est encore plus nette si l'on cherche à faire passer le rayon visuel par l'extrémité d'une tige ne traversant pas complètement le tube et par l'ombre de cette extrémité.

On peut également chercher à faire coïncider en projection le bord de la tache circulaire H et le bord correspondant du diaphragme E. On constate que le rayon visuel passe par le bord opposé du diaphragme D.

De plus le dépôt présente deux zones concentriques

très distinctes. La zone centrale est notablement plus opaque. Il n'est pas facile de voir nettement au travers du dépôt sur quelle direction de propagation se trouve la ligne de démarcation, d'autant plus que cette ligne se détache naturellement moins nettement que le bord de la tache. Étant donné que le bord de la tache est l'intersection avec la paroi, du cône qui s'appuie sur les bords des deux diaphragmes D et E et dont le sommet entre eux, il est naturel de penser que la partie centrale correspond à l'autre cône défini par les deux diaphragmes. Il est clair que si de la matière se propage à l'intérieur de ces deux cônes, la densité du dépôt sera plus grande dans la partie commune.

Le faisceau de matière en mouvement qui sort du volume de vapeur est donc entièrement défini par les deux diaphragmes. Les objets renfermés dans le compartiment C ne modifient en rien le dépôt produit en H s'ils se trouvent en dehors des limites géométriques du faisceau. Si par exemple on dispose un diaphragme excentré en K, le contour du dépôt comprend deux parties : l'une qui est très nettement l'ombre du bord du diaphragme K, pour la portion de ce bord qui traverse le faisceau, l'autre qui est une portion de l'intersection de la paroi du tube et du faisceau non modifié.

La figure 2 reproduit une photographie de la tache obtenue avec un tube semblable au précédent et

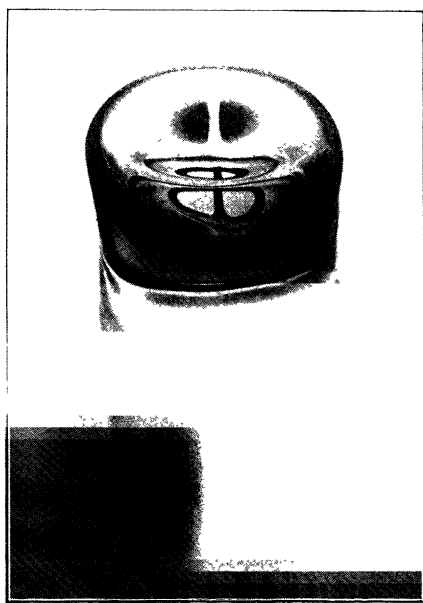


Fig. 2.

contenant du sodium. Une petite baguette de verre traversait la diaphragme K.

La matière en mouvement qui forme le dépôt peut passer par des trous extrêmement petits et en donner la projection très nette. On voit par exemple sur la

figure 3, l'ombre de deux grillages formés de baguettes de verre croisées, obtenue au moyen du tube

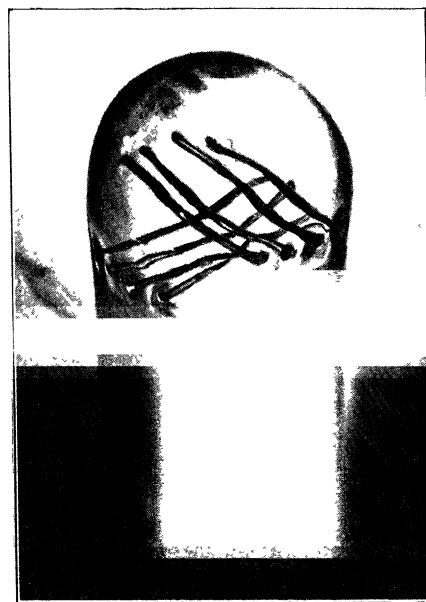


Fig. 3.

représenté par la figure 4. Un accident arrivé au tube à la fin de sa fabrication a eu pour résultat que toutes les petites tiges de verre se sont tordues de manières variées, de sorte que certaines ne laissent entre elles qu'un intervalle très étroit, de quelques dixièmes de millimètre. On voit, par exemple en *b*, que les dépôts obtenus par projection à travers ces petits interstices ne le cèdent pas en netteté aux dépôts de plus grande surface.

Le tube 4 ne possédait pas de diaphragmes. Leur rôle était joué par la portion non chauffée AB du tube étroit. Il est clair que le faisceau est moins exactement défini de cette manière. De plus pour obtenir un dépôt couvrant toute la surface du petit gril de verre il a été nécessaire de chauffer le tube étroit sur une longueur assez grande pour que la

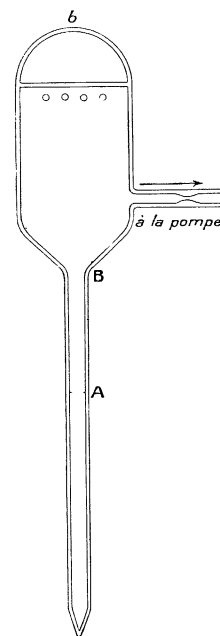


Fig. 4.

partie AB qui définit l'ouverture du cône de projection fût assez courte et l'ouverture du cône suffisante. Il est alors assez difficile de ne pas dépasser le point précis où la distillation commence à se faire un peu partout sur les parois

du tube sous forme d'un dépôt bleuté transparent. En d'autres termes les conditions géométriques définissant le faisceau sont de moins en moins bien définies à mesure que la partie AB est plus courte. Aussi l'ombre du grillage est-elle un peu moins pure que celle qui est reproduite par la figure 2.

J'ai cherché à voir jusqu'à quelle distance de parcours on peut obtenir des ombres nettes. Pour porter ombre j'employais une tige de verre telle que t (fig. 5) ne traversant pas complètement le tube. Plusieurs

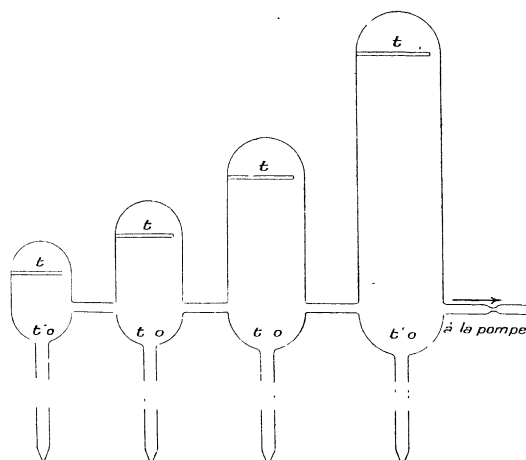


Fig. 5.

tubes analogues, mais de longueurs différentes étaient soudés les uns aux autres de manière à réaliser des conditions de pression identiques. Dans le plus long, mesurant 15 centimètres dans sa partie large, l'ombre de la tige de verre t était encore parfaitement nette. On peut même dire qu'il n'y avait pas de différence marquée entre les différentes ombres. Le tube le plus court mesurait 6 centimètres. La distance des tiges t au sommet des tubes était sensiblement la même pour tous les tubes et égale à 2,5 cm. J'ai essayé également de produire des ombres au moyen de tiges de verre t' soudées près de l'orifice des tubes canalisants. Les ombres en étaient naturellement moins nettes ; de telles ombres doivent même disparaître entièrement pour une certaine distance puisque la source de rayonnement est plus large que l'obstacle. Pour le tube le plus long l'ombre de cette tige, en effet, n'a pas été du tout observable. D'ailleurs pour fixer les distances maxima qu'il est possible de réaliser, soit entre la source de rayonnement et l'obstacle, soit entre l'obstacle et la paroi sur laquelle il doit porter ombre, il faudrait reprendre l'expérience en employant le dispositif des diaphragmes, nettement supérieur au tube étroit.

3. Interprétation. — L'expérience met en évidence d'une manière irréfutable que la matière qui

constitue le dépôt terminal s'est propagée en ligne droite à partir de la masse de vapeur. L'idée la plus simple qui se présente à l'esprit est que le phénomène est dû à l'agitation des molécules mêmes de vapeur dont le mouvement peut ainsi être rendu sensible.

Les molécules de vapeur qui se trouvent dans l'espace chauffé, A, sont agitées en tout sens avec une vitesse moyenne d'agitation thermique qui correspond à la température de cette vapeur. Par exemple pour la vapeur de sodium à 400°, cette vitesse sera de 565^m par seconde environ si la vapeur de sodium est diatomique ou 795^m si elle est monoatomique, puisque la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la température absolue et inversement proportionnelle à la racine carrée du poids moléculaire et que la vitesse des molécules d'hydrogène à 0° est d'environ 1850 mètres par seconde. Après un certain nombre de chocs, certaines de ces molécules passent par le diaphragme D. En fait, comme on ne chauffe pas jusqu'au diaphragme, les vitesses de ces molécules forment un faisceau conique d'ouverture moindre que π s'appuyant sur D, comme l'indique la figure. Parmi ces molécules la plupart tombent sur la paroi du compartiment B où elles doivent former un dépôt d'autant plus épais qu'on s'approche davantage de l'axe du tube, c'est-à-dire du diaphragme E. On s'explique d'ailleurs que le plus grand nombre des molécules parties de A avec une vitesse voisine de l'axe du tube conservent inaltérée la direction de leur vitesse, car les molécules qui sortent de D ont déjà des vitesses peu inclinées les unes sur les autres, et les molécules qui auraient rebondi sur la face inférieure du diaphragme E semblent seules pouvoir troubler un peu le mouvement de celles qui se dirigent suivant l'axe. Celles-là traversent donc en général le second diaphragme ainsi que toutes celles dont les vitesses, au sortir du volume de vapeur, étaient comprises dans l'un des cônes définis plus haut. Leurs vitesses sont alors presque parallèles et le nombre des chocs mutuels devient extrêmement petit ; de plus les quelques rencontres mutuelles qui se produisent doivent modifier très peu les directions des vitesses. Ces molécules, ne rencontrant pas non plus de molécules de gaz étranger en nombre appréciable, continuent leur chemin en ligne droite sur un parcours qui doit être de l'ordre du chemin moyen des molécules du gaz résiduel, c'est-à-dire de plusieurs dizaines de centimètres aux pressions où j'ai opéré. En fait j'ai obtenu, comme je l'ai dit, des ombres très nettes après un parcours d'une vingtaine de centimètres. Je n'ai pu encore essayer des tubes plus longs.

Que se passe-t-il quand les molécules arrivent sur la paroi terminale ? En s'inspirant des conceptions de la théorie cinétique des gaz, on peut penser que les molécules de vapeur, rencontrant dans des conditions

extrêmement variées les molécules de la matière qui constitue la paroi, rebondissent dans toutes les directions et heurtent dans des conditions également variées les nouvelles arrivantes. Il doit donc se former au contact de la paroi un nuage de molécules animées de vitesses quelconques, c'est-à-dire un nuage de vapeur. L'arrivée continue de nouvelles molécules provoque, de la manière habituelle, la condensation sur la paroi.

Toutefois il faut remarquer que la conception précédente sous la forme où l'utilise la théorie cinétique des gaz, suppose que la température de la paroi est la même que celle qui correspond à la vitesse moyenne d'agitation du gaz. Il n'est pas prouvé que, s'il n'en est pas ainsi, si, en particulier, la température de la paroi est plus basse, comme c'est le cas dans mes expériences, la paroi n'exerce pas une action spéciale sur les molécules qui viennent la frapper, leur permettant de s'y fixer.

On remarquera que l'interprétation qui vient d'être donnée ne fait pas intervenir explicitement la tension de la vapeur chauffée dans le compartiment A, tension qui, pour le sodium chauffé à 400°, est d'ailleurs très faible, de l'ordre du dixième de millimètre de mercure d'après les mesures, un peu incertaines, de Jewett¹. C'est qu'en effet cette tension n'est qu'une conséquence de l'agitation thermique que nous avons directement considérée. Elle serait exercée, sur une paroi occupant la place du diaphragme D, par les molécules qui traversent ce diaphragme et dont nous avons suivi la destinée.

Quant à l'objection qui se présente immédiatement à l'esprit et qui consisterait à attribuer le phénomène à un *jet* de vapeur se comportant d'une manière spéciale dans le vide, elle revient, si l'on y réfléchit un instant, à une question de mots. Car ce que prouve indiscutablement l'expérience, c'est que quelque chose de matériel se propage à partir de la vapeur chauffée, *en ligne droite et sans contourner les obstacles*. Si l'on attache au mot *jet* le sens habituel, qui implique essentiellement l'idée de tourbillons derrière les obstacles contournés, l'objection ne se soutient donc pas. Si, au contraire, le *jet* dont on veut parler est constitué de telle sorte que ses parties les plus petites soient animées de mouvements rectilignes parallèles, on ne dit pas autre chose que ce qui a été décrit plus haut, à cela près que ces parties les plus petites ont été supposées être des *molécules* de vapeur.

4. Conséquences. — Il semble que les présentes expériences soient une illustration très directe de la théorie cinétique des gaz, et qu'elles puissent aisément servir de base à des mesures portant sur diverses grandeurs moléculaires, restées jusqu'à présent hors

du domaine de l'expérimentation directe, à commencer par la vitesse moyenne des molécules. Il paraît facile, en effet, de recevoir un faisceau de rayonnement moléculaire géométriquement défini, sur une palette de torsion et de mesurer ainsi la quantité de mouvement transportée par ce rayonnement et par seconde. Si q est cette quantité de mouvement, on aura

$$q = \Sigma mu = M\bar{u}$$

en désignant par u et m la vitesse et la masse d'une molécule, par M la masse déposée par seconde, et par \bar{u} la vitesse moyenne. La mesure de q et de M permettra de calculer \bar{u} .

On peut aussi mesurer la quantité d'énergie transportée par le faisceau en le recevant dans un dispositif calorimétrique ou bolométrique convenable. On aura donc Σmu^2 ou encore $M\bar{u}^2$ et, par conséquent, le quotient $\bar{u} : \bar{u}^2$ qui doit être égal, avec la loi de répartition des vitesses de Maxwell, à $\sqrt{\frac{8}{5\pi}}$. Il semble que l'on puisse obtenir par ce moyen une vérification expérimentale directe de la loi de Maxwell.

La mesure directe de \bar{u}^2 permettra de connaître le poids moléculaire de la vapeur et de savoir, par conséquent, si elle est diatomique ou monoatomique, point d'un grand intérêt et généralement impossible à élucider par les méthodes actuellement existantes pour les vapeurs métalliques.

Il n'est pas douteux que le rayonnement considéré transporte une certaine quantité de mouvement et une certaine quantité d'énergie. Pour les mesurer, il ne peut y avoir à vaincre que des difficultés de pure technique. Aussi me proposai-je d'examiner tout d'abord si le rayonnement transporte des charges électriques, en recevant le faisceau dans un cylindre de Faraday. Des expériences sont actuellement en cours au laboratoire de Mme Curie, en vue de résoudre ce problème, qui est évidemment important au point de vue des propriétés électriques et optiques des vapeurs métalliques. Notons en passant, que la méthode doit permettre d'étudier l'ionisation des vapeurs métalliques sous l'action de sources quelconques, sans nécessiter l'emploi, qu'il est extrêmement difficile de rendre correct, d'électrodes métalliques plongeant dans la vapeur.

Enfin, il va de soi que l'on peut réaliser l'expérience précédente en recevant le rayonnement matériel sur une électrode isolée, de forme appropriée; cela permettra d'étudier les propriétés photo-électriques d'un grand nombre de métaux, dans des conditions qui semblent autoriser l'espoir de résultats toujours comparables à eux-mêmes, à l'inverse de la plupart de ceux qui ont été obtenus jusqu'à présent dans ce domaine.

[Manuscript reçu le 3 avril 1911].

¹ *Phil. Mag.*, 4 (1902) 546.