

768. **Les diverses couleurs se distinguent entre elles, comme les sons de diverses hauteurs, par la rapidité du mouvement vibratoire, ou par la longueur d'onde.** — Des expériences délicates, dans le détail desquelles il nous serait impossible d'entrer, ont permis, non seulement de vérifier les diverses conséquences qui se déduisent de l'hypothèse des ondulations, mais encore de mesurer les longueurs d'ondes lumineuses dans l'air, pour chacune des couleurs simples qui constituent la lumière blanche : ces longueurs d'onde vont en décroissant du rouge au violet, c'est-à-dire qu'elles ont une valeur d'autant plus petite qu'elles se rapportent à une couleur plus réfrangible. — Or, on a vu (645) que, dans un mouvement vibratoire en général, si l'on désigne par v la vitesse de propagation du mouvement, par λ la longueur d'onde, et par n le nombre de vibrations par seconde, on a

$$v = n\lambda.$$

On connaît la vitesse de propagation de la lumière dans l'air, égale à environ 300 000 kilomètres par seconde (814); cette formule permet donc de calculer le nombre de vibrations n , pour une couleur déterminée, étant donnée la longueur d'onde λ .

Pour le jaune, par exemple, la valeur de la longueur d'onde λ est d'environ 6 dix-millièmes de millimètre : on a donc

$$n = \frac{300\,000\,000^m}{0^m,000\,000\,6} = \frac{500}{0,6} \times 10^{12} = 500 \times 10^{12};$$

c'est-à-dire que la lumière jaune correspond à environ 500 trillions de vibrations par seconde. — Pour les autres couleurs, on trouve que le nombre de vibrations par seconde varie entre 400 trillions et environ 700 trillions, en allant du rouge au violet.

On voit que les vibrations lumineuses sont beaucoup plus rapides que les vibrations sonores, puisque les vibrations des sons les plus aigus, perceptibles à l'oreille, ne dépassent guère une vingtaine de mille par seconde (650). — Mais le caractère qui distingue entre elles les lumières de diverses couleurs est le même que celui qui distingue les sons de diverses hauteurs : c'est la rapidité plus ou moins grande du mouvement vibratoire.

II. — ÉTUDE DES SPECTRES DE DIVERSES ORIGINES. — ANALYSE SPECTRALE

769. **Raies du spectre solaire.** — Lorsqu'on produit un spectre solaire, en employant la méthode de Newton pour obtenir un spectre

pur (761), on remarque dans ce spectre des raies obscures, parallèles à l'arête du prisme. L'apparition de ces raies prouve que, dans la lumière du soleil, il n'y a pas continuité parfaite entre les réfrangibilités des radiations qui la constituent : on peut dire qu'il y manque un grand nombre de couleurs simples, dont le degré de réfrangibilité serait déterminé par la place qu'occupent les raies obscures.

La production de ces lignes obscures avait échappé à Newton, probablement à cause du peu d'homogénéité des lentilles dont il pouvait faire usage. Le phénomène a été signalé par Wollaston et par Fraunhofer : c'est Fraunhofer qui en fit, le premier, une étude attentive, et qui par-

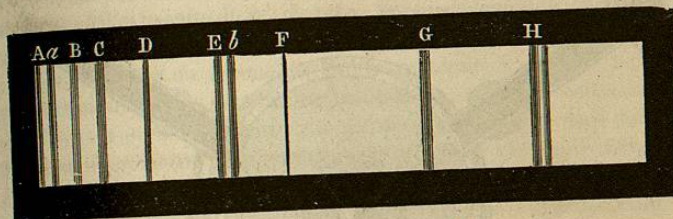


Fig. 657. — Raies du spectre solaire.

vint à compter environ six cents de ces lignes; elles sont ordinairement désignées sous le nom de *raies de Fraunhofer*. — Plus tard, Brewster a pu en distinguer deux mille; M. Kirchhoff et d'autres expérimentateurs en ont encore signalé de nouvelles, en même temps qu'ils ont indiqué d'une manière plus précise la position de celles qui étaient déjà connues.

Ces raies ne sont pas distribuées uniformément dans l'étendue du spectre solaire: on en a distingué d'abord sept groupes principaux, qui ont été désignés par les lettres B, C, D, E, F, G, H, et dont la figure 657 représente la distribution dans les diverses couleurs; on a indiqué, en outre, sur cette figure, quelques autres groupes A, a, b, qu'il est facile d'apercevoir; dans l'intervalle, on découvre encore une multitude de lignes plus fines, distribuées irrégulièrement dans l'étendue du spectre (*).

770. **Spectroscope.** — Le spectre que l'on obtient sur un écran, en employant la méthode de Newton (761) est la succession d'une série

(*) Les raies obscures forment, dans le spectre solaire, des lignes de repère fixes; aussi les a-t-on utilisées pour la détermination précise des indices de réfraction. — Une même substance a, en réalité, autant d'indices de réfraction différents qu'il y a de radiations diverses dans la lumière solaire : on a déterminé, pour les substances employées dans la construction des lentilles et des prismes, les indices de réfraction qui correspondent aux rayons voisins des raies principales. Ces déterminations sont utiles, par exemple, pour la construction des instruments d'optique dans lesquels on veut obtenir un achromatisme aussi parfait que possible.

d'images réelles de la fente, formées chacune par les rayons d'une nuance déterminée. Or, supposons qu'on supprime l'écran, et qu'on place, au delà de la position qu'il occupait et sur le trajet des faisceaux lumineux, une loupe; l'œil placé derrière cette loupe verra l'image *aérienne* du spectre, comme il verrait un objet occupant la même position (726) : le grossissement produit par la loupe permettra, en outre, de mieux distinguer les détails. — Mais la succession de la lentille qui, dans la méthode de Newton, reçoit le faisceau lumineux à sa sortie du prisme, et de la lentille qui constitue la loupe au moyen de laquelle

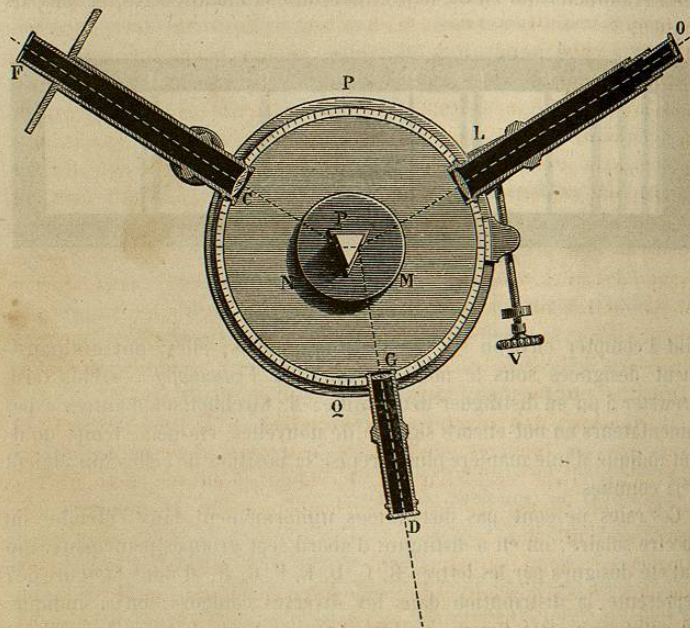


Fig. 658. — Spectroscope.

on regarde le spectre, constitue précisément le système que nous étudierons plus loin sous le nom de *lunette astronomique*. Ce mode d'observation revient donc, en réalité, à placer au delà du prisme P (fig. 658), sur la direction du faisceau réfracté, une lunette LO convenablement ajustée.

Enfin, on place ordinairement la fente F, par laquelle arrivent les rayons, à l'extrémité d'un tube noirci intérieurement, et l'on fixe dans ce tube une lentille C, dont la fente F occupe le foyer principal : les rayons qui viennent de la fente sortent alors de la lentille *parallèlement à son axe principal*, et arrivent sur le prisme comme s'ils venaient d'un objet

placé à l'infini. — Le système formé d'une lentille et d'une fente ainsi disposées porte le nom général de *collimateur*.

L'appareil dont nous venons d'indiquer les éléments essentiels a été désigné sous le nom de *spectroscope*. — Pour rendre les observations plus précises, M. Kirchhoff place le prisme P au centre d'un limbe circulaire, et le collimateur FC en un point du contour de ce cercle, de manière que son axe aille rencontrer l'une des faces du prisme; la lunette OL est mobile autour d'un axe passant par le centre du timbre et perpendiculaire à son plan, de manière à permettre d'explorer le faisceau réfracté par le prisme. — Enfin, pour comparer entre elles les positions des diverses raies, on fixe sur le limbe un *tube micrométrique* DG. A l'extrémité D de ce tube, est une plaque de verre bien éclairée, sur laquelle on a gravé une petite échelle formée de traits fins, parallèles à l'arête du prisme; à l'autre extrémité G est une lentille qui fonctionne encore comme un collimateur, envoyant sur la première face du prisme, en faisceaux parallèles, les rayons émis par les traits du micromètre : ces rayons sont réfléchis par cette face, et viennent former dans la lunette une image aérienne du micromètre, laquelle se superpose à celle du spectre et est vue en même temps. Chacune des raies du spectre peut alors être caractérisée par la division du micromètre à laquelle elle correspond.

Nous allons montrer maintenant comment l'étude des spectres fournis par les sources lumineuses artificielles a conduit à expliquer la formation des raies obscures dans le spectre solaire.

771. Spectres des lumières artificielles. — L'étude des spectres fournis par les lumières artificielles, entreprise d'abord par divers observateurs, a été reprise par MM. Kirchhoff et Bunsen, dont les recherches sont venues donner à l'ensemble de ces phénomènes une importance inattendue.

Quand on chauffe progressivement un corps *solide* ou *liquide*, en observant en même temps au spectroscope la lumière qu'il émet, on constate que, à la température du rouge naissant, le spectre se compose presque uniquement de rayons rouges, c'est-à-dire des rayons les moins réfrangibles; puis, à mesure que la température s'élève, on voit apparaître dans le spectre, à la suite du rouge, des rayons orangés, puis des rayons jaunes, verts, etc., par ordre de réfrangibilité croissante; les rayons violets apparaissent seulement à la *température blanche*. — En d'autres termes, le spectre s'étend d'une manière progressive, à mesure que l'incandescence du corps devient plus vive; mais le spectre de ces corps *solides* ou *liquides* est toujours un *spectre continu*, sans intervalles obscurs.

Au contraire, les corps *gazeux* incandescents émettent une lumière qui est caractérisée par un *spectre discontinu*. On constate bien encore que des rayons de réfrangibilités croissantes apparaissent à mesure

que la température s'élève; mais chaque corps n'émet que certaines espèces de rayons, de réfrangibilités déterminées, en sorte que le spectre des gaz reste toujours formé de *lignes brillantes, séparées par de larges intervalles obscurs*. — Ces lignes brillantes ont une couleur et une position *caractéristiques*, pour chaque gaz en particulier.

Pour constater ces propriétés, qui distinguent les corps gazeux des corps solides ou liquides, il est indispensable d'opérer avec des corps *complètement gazeux*. Les résultats offrent une netteté remarquable quand on emploie, par exemple, les gaz raréfiés contenus dans les tubes de Geissler (610), et rendus incandescents par le passage de courants d'induction. — Au contraire, quand on observe au spectroscopie les flammes de gaz tenant en suspension des particules solides, on obtient des spectres continus, parce que l'éclat des particules solides incandescentes l'emporte sur l'éclat du gaz lui-même. Ainsi, les flammes de nos bougies, de nos lampes, qui doivent leur propriété éclairante aux parcelles de charbon mises en liberté pendant la combustion, donnent toujours des spectres continus, dans lesquelles certaines parties ont seulement une intensité prédominante.

L'arc électrique, lorsqu'on a soin d'éloigner les extrémités des corps solides entre lesquels il jaillit, de manière que leur éclat propre ne vienne pas compliquer le phénomène (622), fournit un spectre caractérisé par des bandes extrêmement brillantes, variables avec la nature des corps qui terminent les conducteurs et caractéristiques de ces corps. — Cette remarque confirme l'idée que nous avons émise précédemment, à savoir, que l'arc est formé par des particules matérielles, vaporisées et transportées d'un pôle à l'autre (622).

772. Analyse spectrale. — Les différences qui distinguent les spectres produits par les divers corps, à l'état de gaz ou de vapeurs incandescentes, ont conduit à une méthode d'analyse, d'une extrême sensibilité. — Plaçons, devant la fente F du spectroscopie, un de ces becs de gaz qui sont connus sous le nom de *brûleurs de Bunsen*, et dans lesquels l'arrivée d'un courant d'air au milieu de la flamme a pour effet de brûler complètement le charbon et de rendre la flamme à peine visible. Si nous introduisons, à la base de la flamme, un fil de platine humecté avec un sel métallique volatil, nous verrons apparaître, dans le spectre, des lignes brillantes, caractéristiques de la nature du métal. C'est ainsi que la présence du sodium est accusée par une double raie jaune, très brillante; celle du lithium, par une raie rouge et par une raie jaune différente de la raie du sodium; celle du strontium, par des raies rouges et orangées, et par une raie bleue, etc.

Enfin, l'apparition de raies particulières, n'appartenant à aucun des métaux déjà connus, a conduit presque immédiatement MM. Kirchhoff et Bunsen à la découverte de deux nouveaux métaux, le cæsium et le rubidium, qui ont ensuite été isolés par eux, au moyen de procédés chi-

miques. — Bientôt après, un troisième métal, le thallium, signalé en Angleterre par M. Crookes, sur la simple apparition d'une raie verte spéciale, a été isolé en France par M. Lamy. — Plus récemment encore, un nouveau métal, le gallium, a été découvert d'une manière semblable par M. Lecoq de Boisbaudran.

773. Expérience du renversement de raies. — Voici maintenant une expérience qui est devenue, pour M. Kirchhoff, le point de départ de la théorie qui l'a conduit à l'explication des raies obscures du spectre solaire.

L'analyse spectrale avait montré que la flamme de l'alcool salé, et en général toutes les flammes qui doivent leur couleur à un sel de sodium, produisent une lumière dont le spectre se réduit à une bande jaune *brillante*, occupant dans le spectroscopie exactement la place de la raie *obscur*e du spectre solaire, que Fraunhofer avait désignée par la lettre D. D'autre part, on savait également, ainsi qu'il a été dit (771), que si l'on fait arriver dans le spectroscopie un faisceau de lumière émis par un corps solide porté à une haute température, comme le bâton de chaux de la lumière de Drummond, on observe un spectre très brillant et absolument *continu*. — Or, M. Kirchhoff a montré que, si l'on place, sur le trajet de ce faisceau lumineux, la flamme de l'alcool salé, on voit apparaître, dans ce spectre continu, une bande *obscur*e, occupant exactement la place D.

De cette expérience, il résulte qu'une flamme contenant un sel de sodium, en même temps qu'elle a la propriété d'*émettre* exclusivement des rayons jaunes, possède aussi la propriété d'*absorber* la lumière jaune émise par une source lumineuse plus intense, sans absorber les autres couleurs que contient cette lumière. — De même, le chlorure de lithium, placé dans une flamme non éclairante, donne un spectre remarquable par une ligne rouge *brillante*, qui correspond à peu près au milieu de l'intervalle compris entre les raies B et C de Fraunhofer. Cette flamme, placée sur le trajet du faisceau lumineux produit par la lumière de Drummond, fait apparaître, dans le spectre de cette lumière, une raie *obscur*e correspondante.

Ces résultats ont été rattachés par M. Kirchhoff à un principe qui avait été établi par l'expérience, pour la chaleur rayonnante en particulier (84), le principe de *l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant* d'un même corps, pour des rayons d'une espèce déterminée. — En généralisant ce principe, on devra raisonner comme il suit. Puisque la flamme de l'alcool salé donne, à la température de sa combustion, un spectre qui se réduit à une bande jaune, cette flamme n'a de pouvoir émissif, à cette température, que pour les radiations jaunes: elle doit donc avoir un pouvoir absorbant considérable pour les radiations jaunes émanées d'une autre source, et un pouvoir absorbant sensiblement nul pour toutes les radiations d'une autre couleur. Dès lors,

lorsque le faisceau de la lumière de Drummond traverse cette flamme, les rayons jaunes de ce faisceau perdent une partie considérable de leur intensité; d'autre part, les rayons jaunes émis par la flamme elle-même, qui est à une température plus basse, n'ont pas une intensité qui compense la perte d'éclat du faisceau transmis. On doit donc bien obtenir, dans la région du spectre qui correspond aux rayons de cette couleur, une bande obscure, tranchant sur les autres couleurs dont l'éclat n'est pas amoindri.

Cette explication s'étend à toutes les expériences semblables, c'est-à-dire à toutes celles dans lesquelles on produit le phénomène qui est aujourd'hui désigné sous le nom de *renversement des raies* (*).

774. Explication de la production des raies du spectre solaire, d'après M. Kirchhoff. — Pour expliquer la production des raies obscures dans le spectre de la lumière solaire, il suffit d'admettre, avec M. Kirchhoff, que le noyau solide ou liquide de l'astre est enveloppé d'une *photosphère* gazeuse, dont l'éclat est notablement inférieur au sien. Sans la présence de cette photosphère, le noyau enverrait une lumière qui produirait un spectre continu (771); mais la photosphère se comporte, par rapport à la lumière émise par le noyau, comme la flamme d'alcool salé par rapport à la lumière émise par la chaux incandescente, c'est-à-dire que la lumière du noyau perd, en traversant la photosphère, la plus grande partie des rayons dont la réfrangibilité correspond à ceux que la photosphère émet elle-même.

M. Kirchhoff a déterminé, avec le plus grand soin, la position des raies obscures du spectre solaire, pour la comparer à celle des raies brillantes des corps connus: on voit, en effet, que si l'on constate une coïncidence exacte, entre certaines raies *obscures* du spectre solaire et les lignes *brillantes* fournies par un corps à l'état gazeux, on en pourra conclure la présence de ce corps dans la photosphère du soleil. De là, la possibilité d'une véritable *analyse de l'atmosphère solaire*, analyse qui a déjà fourni les résultats les plus remarquables. — L'hydrogène, le sodium, le calcium, le magnésium, le fer, le chrome, le zinc, font partie de l'atmosphère du soleil: pour le fer, en particulier, cette assertion est fondée sur la concordance entre un nombre considérable de

(*) Léon Foucault, en éclairant une fente dans une moitié de sa longueur par la lumière solaire, et dans l'autre moitié par l'arc voltaïque, avait constaté la coïncidence entre la bande obscure D de la lumière solaire et la bande jaune brillante signalée par tous les observateurs dans la lumière électrique et dans la plupart des lumières artificielles. De plus, en faisant passer la lumière solaire au travers d'un arc voltaïque, dont l'éclat est moindre, il avait observé que la bande obscure D du spectre devenait beaucoup mieux accusée que dans le spectre solaire ordinaire. — Swann avait montré également que la présence de la bande jaune brillante, dans les spectres de la plupart des lumières artificielles, tient à ce qu'il suffit de traces presque imperceptibles de chlorure de sodium dans une flamme, pour faire apparaître cette bande brillante. — Jusqu'à M. Kirchhoff, ces diverses observations étaient restées à peu près isolées.

raies brillantes du spectre fourni par le métal en vapeur, et des raies obscures observées dans le spectre solaire.

775. Raies telluriques. — Certaines bandes obscures, observées dans le spectre solaire, doivent être considérées comme ayant pour origine l'absorption de certains rayons lumineux par l'atmosphère de la terre: elles augmentent d'intensité quand le soleil s'approche de l'horizon, parce que la couche d'air traversée par les rayons solaires est alors plus épaisse: ces bandes ont reçu le nom de *raies telluriques*.

M. Jansen a montré qu'on peut faire apparaître la plupart de ces raies, dans le spectre d'une lumière artificielle, en faisant traverser à cette lumière une couche épaisse de vapeur d'eau: c'est donc surtout à la présence de la vapeur d'eau dans notre atmosphère, qu'il faut attribuer la production des raies telluriques.

776. Résultats relatifs à l'étude physique des corps célestes. — Les *planètes* ne nous renvoyant que la lumière qu'elles reçoivent du soleil, on devait s'attendre à retrouver, dans leurs spectres, les mêmes lignes obscures que dans le spectre solaire: c'est ce que confirme l'observation. Mais une étude attentive a montré que les spectres fournis par Jupiter et par Saturne présentent, même quand ces astres sont bien au-dessus de notre horizon, des raies obscures, analogues à celles que produit l'absorption due à la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère terrestre. On est ainsi conduit à admettre, comme d'autres observations l'avaient déjà fait penser, qu'il existe, à la surface de ces planètes, de grandes nappes d'eau, entretenant leur atmosphère dans un état d'humidité continue. — Quant à la lune, l'analyse spectrale, aussi bien que les autres modes d'observation, indique qu'elle n'a pas d'atmosphère gazeuse.

Les *étoiles* émettant une lumière propre, l'étude des spectres qu'elles fournissent présente un intérêt tout particulier. — Pour toutes les étoiles proprement dites, on obtient des spectres *continus*, sillonnés de raies obscures: ces astres sont donc constitués, comme le soleil, par un noyau solide ou liquide, entouré d'une atmosphère absorbante. La nature chimique de cette atmosphère pourra être révélée par la position des lignes obscures, dans le spectre de chacune d'elles.

Quant aux *nébuleuses non résolubles*, c'est-à-dire dans lesquelles les instruments les plus puissants ne distinguent qu'une sorte de nuage lumineux, elles fournissent, en général, un spectre formé de quelques lignes brillantes se détachant sur un fond obscur. Cette apparence est celle qui caractérise les corps entièrement gazeux: la couleur et la position relative de ces raies brillantes permettront de déterminer la nature chimique de ces corps, si l'on peut identifier ces lignes elles-mêmes avec celles qui caractérisent tel ou tel corps simple, parmi ceux qui nous sont connus. C'est ainsi qu'on a pu déjà constater la présence de l'hydrogène et de l'azote, dans la plupart des nébuleuses.