

> l'orchestre tombait d'une grande hauteur, le public entendrait la pièce en *fa* majeur plutôt qu'en *mi* majeur.

L'attaque de Petzval déconcerta Doppler. Le principe de l'effet Doppler avait déjà été vérifié pour les ondes acoustiques par Buys Ballot et par John Scott Russell, un ingénieur des chemins de fer et de la marine britannique, qui sera le découvreur des solitons, ou ondes solitaires, se propageant dans un canal. En outre, en France, Hippolyte Fizeau avait proposé la même théorie pour la lumière en 1848. N'étant pas au courant des travaux de Doppler, il avait correctement prédit que l'effet serait observable dans les décalages de fréquence des étroites raies spectrales d'émission des étoiles en mouvement, et non dans leur changement global de couleur. Fizeau présenta ses résultats lors d'une conférence à la Société philomathique de Paris le 29 décembre 1848. C'est pourquoi on parle aussi d'«effet Doppler-Fizeau».

PETZVAL GAGNE LA PARTIE

Doppler répliqua à l'attaque de Petzval en demandant simplement à son adversaire si un phénomène observé doit être considéré comme inexistant s'il ne peut être déduit d'équations différentielles. Aussi raisonnable que soit cet argument, une majorité de membres de l'académie se rangea du côté de Petzval, et seuls quelques autres, dont Andreas von Ettingshausen, prirent la défense de Doppler.

La décision finale de l'académie devait être prise lors d'une réunion le 21 octobre 1852. Une fois de plus, Petzval fut autorisé à présenter ses arguments. Mais Doppler ne put y assister : le stress et la déception causés par l'affaire eurent des conséquences négatives sur sa santé, qui s'effondra après des années de lutte contre la tuberculose. Lorsque les membres de l'académie apprirent qu'il préparait un voyage à Venise en vue d'améliorer sa santé, certains considérèrent à tort que Doppler se retirait de la mêlée et qu'il concédait sa défaite. Les membres se prononcèrent en faveur de Petzval et déclarèrent que la théorie de Doppler devait être «abandonnée, puisqu'elle est fausse, comme cela a été démontré».

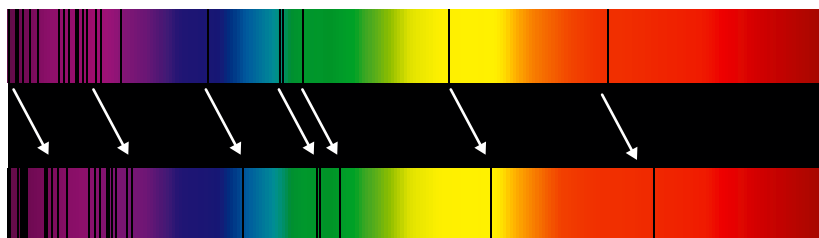
Dix jours plus tard, Doppler fut officiellement démis de ses fonctions de directeur de l'Institut de physique de Vienne et remplacé par Ettingshausen. Mais Doppler était déjà en route pour Venise, où il mourut de sa maladie quatre mois plus tard seulement.

ERNST MACH CONFIRME L'EFFET DOPPLER ACOUSTIQUE

C'était peut-être la fin de l'affaire à l'Institut de physique de Vienne, mais Ettingshausen n'était pas prêt à abandonner l'effet Doppler simplement parce qu'un comité avait déclaré

qu'il n'existait pas. Plusieurs années plus tard, il proposa à son étudiant Ernst Mach de construire un dispositif de laboratoire destiné à démontrer directement l'effet Doppler acoustique. Mach construisit et testa un système à anche tournante où des tubes acheminaient de l'air à celle-ci et la faisaient vibrer à sa fréquence naturelle, tout en dirigeant le son produit vers un observateur immobile. Pendant que le dispositif tournait, l'anche s'approchait et s'éloignait alternativement de l'observateur, qui pouvait entendre les tonalités qui montaient et descendaient rapidement.

Petzval continua cependant à nier l'effet et reprocha à Mach une stupidité liée à son jeune âge et de gâcher ses chances de carrière en s'accrochant à une théorie abandonnée. En réponse, Mach conçut un appareil encore plus ingénieux, qui permettait d'entendre dans une



direction les tons montants et descendants du son et dans une direction orthogonale, dans laquelle l'anche et l'observateur sont relativement stationnaires, un son de hauteur constante. Cette configuration démontrait même le principe de conservation des fréquences cher à Petzval. Malgré ces démonstrations, Petzval n'était jamais satisfait et, au cours des années suivantes, Mach dut subir la confusion et l'incrédulité persistantes de beaucoup d'autres, jusqu'à ce qu'il refuse finalement de discuter plus avant de l'effet.

L'ÉMERGENCE DE L'EFFET DOPPLER OPTIQUE

Bien que les indices expérimentaux en faveur de l'effet Doppler acoustique se soient régulièrement accumulés, les démonstrations correspondantes de l'effet Doppler optique ont tardé à émerger. La percée eut lieu en 1868 grâce à William Huggins. Ce Britannique était l'un des pionniers de la spectroscopie appliquée à l'astronomie et était célèbre pour avoir découvert que certaines nébuleuses étaient constituées de gaz atomiques, tandis que d'autres étaient formées d'étoiles. Huggins correspondit avec James Clerk Maxwell pour confirmer le bien-fondé des arguments de Doppler, que Maxwell corrobora en utilisant sa nouvelle théorie électromagnétique. En mai 1868, Huggins lut un article à la Société

Décalage vers le rouge des raies d'absorption dans le spectre visible du superamas de galaxies BAS11, comparé au spectre du Soleil. Ce décalage est très important, la vitesse de récession du superamas, due à l'expansion de l'Univers, étant très grande.

royale de Londres faisant état des décalages observés dans les raies spectrales des étoiles, en particulier Sirius.

Le rapport de Huggins sur l'effet Doppler pour Sirius n'était pas tout à fait scientifiquement exact, mais il convainquit la communauté scientifique de l'existence de l'effet Doppler optique. Un an plus tard seulement, l'Anglais Joseph Norman Lockyer, codécouvreur de l'hélium, observa un décalage des raies spectrales des protubérances solaires – des masses de gaz lumineuses éjectées du Soleil à grande vitesse. Lockyer ne mentionna pas l'effet Doppler associé, et comme il n'y avait pas de méthode pour confirmer la vitesse des protubérances, ses observations n'ont pas constitué une preuve décisive de l'effet Doppler optique.

Un astronome allemand, Hermann Vogel, commença à travailler avec un nouveau spectrographe qui projetait le spectre lumineux d'un point du côté gauche du Soleil à proximité du spectre d'un point situé sur le côté droit de l'astre. Cela permettait de doubler l'effet visible du décalage Doppler sur les fines raies spectrales, et Vogel put calculer une vitesse de rotation équatoriale du Soleil qui correspondait étroitement à la valeur déduite du mouvement des taches solaires. Ces résultats furent publiés en 1872 et constituèrent la première preuve concluante de l'effet Doppler optique.

LA PREUVE PAR LA SPECTROSCOPIE

Vogel s'efforçait également d'améliorer les mesures de la vitesse radiale des étoiles – leur vitesse le long de la ligne de visée – et était parfaitement conscient que les nombreuses valeurs citées par Huggins et d'autres pour les vitesses stellaires étaient du même ordre que les incertitudes de mesure. L'observation des raies spectrales simplement au moyen des yeux était le principal problème. Or les astronomes avaient commencé à utiliser des plaques photographiques sur les télescopes, et Vogel adapta cette nouvelle technique au problème des vitesses radiales. En 1887, il installa des dispositifs photographiques sur le télescope et le spectrographe de l'Observatoire de

Potsdam et fit des observations sur les décalages Doppler des raies spectrales des étoiles jusqu'en 1890. Vogel publia un premier rapport d'étape en 1891, et son article définitif de 1892 livra les premières valeurs précises des vitesses radiales stellaires.

Cinquante ans après la lecture par Doppler de son article à la Société royale des sciences de Bohême, l'effet Doppler était devenu un ingrédient clé de l'astrophysique quantitative. En 1901, Aristarkh Bépolsky, un astronome russe, parvint finalement à démontrer le phénomène en laboratoire, grâce à un dispositif comportant des miroirs en rotation rapide.

LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ S'IMMISCÉ

Lors de la réunion de janvier 1887 de la Société royale des sciences à Göttingen, en Allemagne, Woldemar Voigt présenta un article où il obtenait l'expression de l'effet Doppler optique longitudinal dans un milieu incompressible. C'était une réaction aux résultats publiés en 1886 par les physiciens américains Albert Michelson et Edward Morley de leurs mesures du coefficient d'entraînement de Fresnel (censé caractériser l'entraînement de l'«éther», support supposé de la propagation de la lumière, par un milieu matériel en mouvement) en utilisant une version améliorée de l'expérience de Fizeau de 1851, où de la lumière se propageait à travers de l'eau en mouvement.

Voigt fit remarquer que l'équation régissant la propagation des ondes lumineuses était invariante sous certaines transformations des coordonnées dans lesquelles les physiciens d'aujourd'hui reconnaissent immédiatement, à un facteur d'échelle près, la transformation de Lorentz de la théorie de la relativité restreinte (qui décrit la transformation des coordonnées d'espace et de temps entre deux référentiels animés l'un par rapport à l'autre d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme).

Ainsi, Voigt obtint l'expression de l'effet Doppler longitudinal en tenant compte sans le savoir d'effets relativistes, et cela quelques

La première détection d'une planète hors du Système solaire a été réalisée en 1995 en mettant en évidence, grâce à l'effet Doppler sur les raies d'absorption dans le spectre de la lumière, des variations périodiques de la vitesse radiale de l'étoile 51 Pegasi. Ces variations, qui sont d'environ ± 60 mètres par seconde d'après les mesures, sont dues au mouvement orbital de l'étoile autour du centre de masse du système constitué de l'étoile et d'une planète ayant à peu près la masse de Jupiter. Le schéma ci-dessous montre quelques étapes successives de ce mouvement.

