

DURÉE LIBRE

Au lieu de
~~8,20 €~~
par mois

Partie réservée au service abonnement Ne rien inscrire

L'ESSENTIEL

> En 1842, Christian Doppler avança que le mouvement des étoiles avait une influence sur leur couleur apparente, la fréquence des ondes lumineuses perçue par l'observateur devant être, d'après son raisonnement, modifiée.

> L'effet Doppler a été d'abord confirmé sur le son,

et seulement beaucoup plus tard sur la lumière.

> Les idées de Doppler et sa carrière ont été mises à mal par un rival, Joseph Petzval.

> L'effet Doppler s'est finalement imposé et intervient aujourd'hui dans de nombreuses applications.

L'AUTEUR



DAVID NOLTE
professeur de physique
et d'astronomie à l'université
Purdue, dans l'Indiana,
aux États-Unis

La chute et l'ascension de l'effet Doppler

L'effet d'un mouvement sur la fréquence des ondes, prédit dès 1842 par Christian Doppler, est aujourd'hui bien connu et familier. Les idées du physicien autrichien se sont pourtant heurtées à beaucoup de scepticisme et ne se sont imposées que un demi-siècle plus tard.

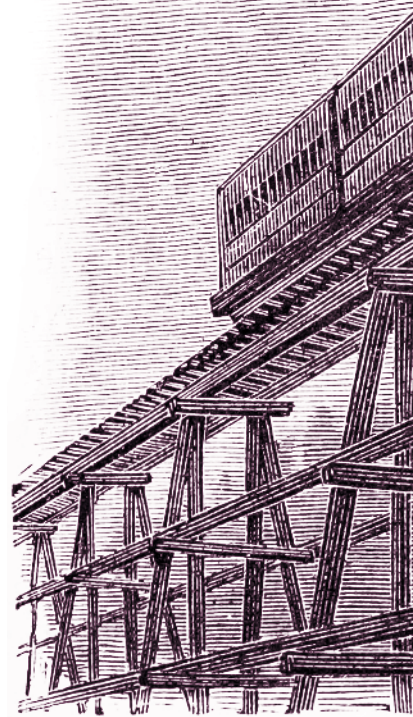
De toutes les découvertes éponymes issues de la physique du XIX^e siècle – franges d'interférence de Young, lentille de Fresnel, cycle de Carnot, effet Faraday, équations de Maxwell, etc. –, une seule fait l'objet de mentions quasi quotidiennes : l'effet Doppler. Il s'agit du changement de fréquence de l'onde perçue par un observateur en mouvement par rapport à la source émettrice (*voir la figure page 75*). Dans sa version acoustique, c'est l'effet ressenti lorsqu'un véhicule, un train ou un avion s'approche de vous puis s'éloigne : le son passe soudainement d'un ton aigu à un ton plus grave.

Albert Einstein est peut-être le nom le plus célèbre de la physique, mais celui de Christian Doppler est probablement le plus usité. Ironie de l'histoire, ce physicien autrichien a subi les attaques d'un pompeux rival, ses idées ont été ridiculisées, son poste universitaire lui a été retiré, et il s'est vu forcé d'abandonner Vienne dans la disgrâce publique et la santé déclinante.

Malgré l'ignominieuse fin de vie de Doppler, l'effet qui porte son nom permet aujourd'hui aux scientifiques de connaître le mouvement de la Terre par rapport à son environnement cosmique, de refroidir les atomes dans des pièges à laser jusqu'à une fraction de degré au-dessus du zéro absolu, de détecter des planètes en orbite autour d'étoiles lointaines, de visualiser le flux sanguin dans les artères, etc. Alors pourquoi les pairs de Doppler ont-ils si longtemps rejeté son effet, et comment l'effet en question a-t-il été réhabilité et devenu à ce point familier ?

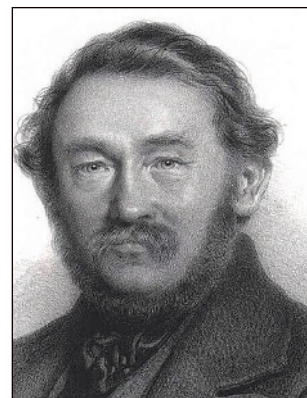
UN DÉBUT DE CARRIÈRE DIFFICILE

L'histoire commence par une carrière troublée qui a failli ne pas démarrer. Doppler est né en 1803 à Salzbourg, en Autriche, dans une vieille famille de tailleurs de pierre. À l'âge de 30 ans, son poste temporaire d'assistant en mathématiques à l'Institut polytechnique impérial et royal de Vienne (aujourd'hui >



Quand un train s'approche, son sifflement est perçu avec un ton plus aigu que lorsqu'il est immobile. Lorsqu'il s'éloigne, le ton est plus grave. Cet effet Doppler acoustique a été mis en évidence pour la première fois en 1845, lors d'une expérience où des musiciens embarqués sur un wagon ouvert ont joué une note précise le long du trajet entre Utrecht et Maarssen, aux Pays-Bas.





À gauche : Christian Doppler, probablement aux alentours de 1840. Au milieu et ci-dessus : trois des scientifiques qui ont joué un rôle important dans l'histoire de l'effet Doppler. Le Néerlandais Christoph Buys Ballot (au milieu en haut) a mis en évidence pour la première fois l'effet Doppler pour le son, en 1853. Le Hongrois Joseph Petzval (ci-dessus) s'est obstinément opposé à Doppler et à l'effet éponyme. L'Allemand Hermann Vogel (ci-contre) a publié en 1872 des travaux de spectroscopie du Soleil qui constituaient la première démonstration convaincante de l'effet Doppler pour la lumière.

> TU Wien) prenait fin; mais il ne parvint pas à retrouver un poste et dut se contenter d'un emploi de comptable dans une usine de coton.

Au début du XIX^e siècle, l'Empire autrichien était un État bureaucratique tentaculaire qui empilait les couches de réglementations et où il y avait pléthore de candidats compétents pour n'importe quel poste. En dépit de ses études supérieures, Doppler s'est perdu dans cet univers. Ses candidatures à des postes permanents n'ont pas été retenues et, dans le désespoir de ne jamais trouver une situation convenable, il décida d'émigrer aux États-Unis. Il vendit la plupart de ses biens pour payer son voyage et se rendit au consulat américain de Munich afin d'obtenir les documents nécessaires. Mais à son retour en Autriche, à la veille de quitter l'Europe pour un avenir incertain, il reçut une offre pour un poste d'enseignant dans un lycée de Prague, poste qu'il occupa à partir de 1835.

Doppler commença à publier des articles scientifiques et, en 1837, il fut nommé professeur supplémentaire de mathématiques supérieures et de géométrie à l'Institut polytechnique de Prague (aujourd'hui université technique tchèque); en 1841, il fut promu professeur titulaire de géométrie appliquée. Il y rencontra Bernard Bolzano, agitateur politique et mathématicien qui a travaillé sur des définitions rigoureuses de la notion de limite, aujourd'hui célèbre pour sa

contribution au «théorème de Bolzano-Weierstrass», en topologie, qui donne une caractérisation des espaces compacts. Bolzano présidait une réunion de la Société royale des sciences de Bohême le 25 mai 1842, le jour où Doppler lut un document faisant date sur la couleur des étoiles devant une maigre assemblée constituée de seulement cinq membres de la société.

Doppler s'était passionné pour l'astronomie et pour le phénomène de l'aberration stellaire. Celui-ci a été découvert par le Britannique James Bradley en 1727 et pouvait s'expliquer par le mouvement de la Terre autour du Soleil combiné à la vitesse finie de la lumière, qui fait que la position apparente d'une étoile distante change légèrement au cours de l'année.

CHANGEMENT DE COULEUR POUR UNE ÉTOILE EN MOUVEMENT?

En étudiant les travaux de Bradley, Doppler s'est demandé comment le mouvement relatif de la Terre influencerait sur la couleur de l'étoile. En faisant une analogie simple avec un navire se déplaçant dans le même sens que les vagues ou en sens contraire, il parvint à la conclusion que la fréquence des ondes lumineuses frappant l'œil se comportait de la même façon que celle des vagues frappant la proue du navire. Il en déduisit que la couleur de la lumière serait légèrement décalée vers le bleu (augmentation

Article traduit et adapté de « The fall and rise of the Doppler effect », paru dans *Physics Today* (mars 2020, pp. 30-35), avec l'autorisation de l'American Institute of Physics.

de la fréquence) si l'œil se rapprochait de la source lumineuse, et vers le rouge (diminution de la fréquence) s'il s'en éloignait.

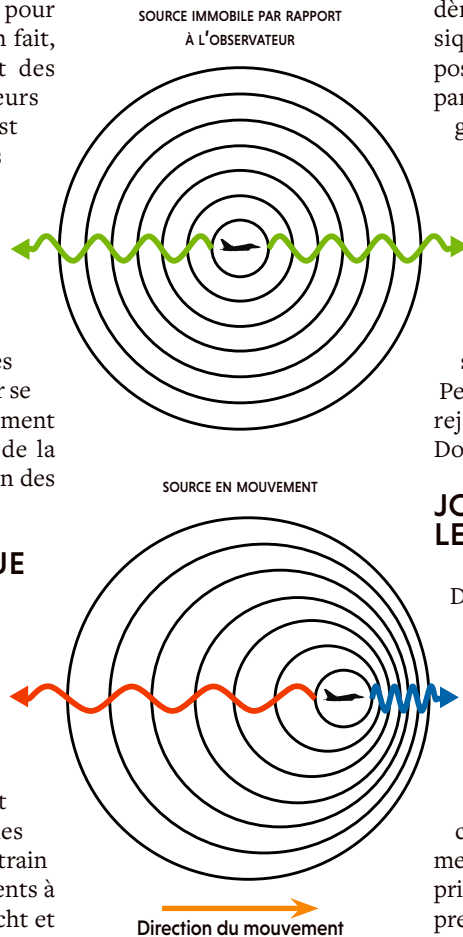
L'intérêt que Doppler portait à l'astronomie l'avait familiarisé avec les étoiles binaires, où le mouvement relatif de la source lumineuse pourrait être suffisamment important pour induire des changements de couleur. En fait, les catalogues d'étoiles comprenaient des exemples de binaires ayant des couleurs rouge et bleue complémentaires. C'est pourquoi son article, publié dans les comptes rendus de la Société royale des sciences de Bohême quelques mois après sa lecture à la société, était intitulé « Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels » (« Sur la lumière colorée des étoiles doubles et de quelques autres étoiles du ciel »). Bien que Doppler se soit trompé en supposant que le mouvement stellaire provoquerait un changement de la couleur globale d'une étoile, sa dérivation des décalages de fréquence était correcte.

L'EFFET DOPPLER ACOUSTIQUE TESTÉ AVEC DES MUSICIENS SUR UN TRAIN

Beaucoup de ceux qui avaient entendu parler de la théorie de Doppler n'y croyaient pas. Cependant, par une froide matinée de février 1845, le scientifique néerlandais Christoph Buys Ballot, qui venait de recevoir son doctorat de l'université d'Utrecht, demanda à des musiciens d'embarquer sur un wagon de train ouvert et de souffler dans leurs instruments à vent le long de la voie ferrée entre Utrecht et Maarssen. Buys Ballot ne pensait pas que les étoiles changeraient de couleur en raison de leur mouvement, mais, n'ayant aucun moyen de tester l'effet sur la lumière, il avait décidé de le tester sur le son.

Malheureusement, les musiciens furent importunés par la grêle et la neige, ce qui les empêcha de souffler correctement dans leurs instruments. L'expérience fut donc reconduite au mois de juin, plus clément. Cette fois, les trompettistes du wagon réussirent à jouer une note stable, et les musiciens stationnés à côté des rails purent entendre une note plus haute d'un demi-ton quand le wagon s'approchait et plus basse d'un demi-ton quand il s'éloignait. L'expérience valida la théorie de Doppler pour le son. Buys Ballot publia un article décrivant l'expérience, mais il refusa tout de même d'admettre que la lumière pouvait changer de couleur, malgré l'étroite analogie entre le son et la lumière.

La prolifique production scientifique de Doppler, associée à des partisans influents qui appréciaient l'importance de son travail, attira



On considère une source qui émet une onde sinusoïdale (acoustique, lumineuse ou autre) se propageant à la même vitesse dans toutes les directions. Lorsque la source est immobile, les fronts d'onde sont (en deux dimensions) des cercles centrés sur la source et régulièrement espacés, l'espacement étant inversement proportionnel à la fréquence de l'onde. Quand la source est en mouvement, les cercles des fronts d'onde se décalent dans la direction du mouvement (car chacun est centré sur le point d'émission correspondant, lequel se déplace). On voit ainsi qu'un observateur percevra une fréquence supérieure (un décalage vers le bleu pour une onde lumineuse) s'il est situé à l'avant, c'est-à-dire si lui et la source se rapprochent, et une fréquence inférieure (un décalage vers le rouge) s'il est situé à l'arrière, c'est-à-dire si lui et la source s'éloignent. Tel est le principe de l'effet Doppler.

l'attention de l'empereur d'Autriche, François-Joseph, nouvellement couronné après que son oncle eut été contraint d'abdiquer pendant les révolutions de 1848. Réformer les enseignements était une haute priorité pour certains des conseillers de l'empereur, qui le persuadèrent de fonder le premier institut de physique d'Autriche et de nommer Doppler au poste de son premier directeur. Enthousiasmé par les perspectives qui s'offraient et regorgeant d'idées, Doppler se lança dans sa nouvelle fonction.

En tant que membre de l'Académie autrichienne des sciences, il proposa un prix pour le développement de la photographie afin de faire progresser la recherche scientifique. Malheureusement, les objectifs photographiques étaient la spécialité d'un autre membre, Joseph Petzval. Ses partisans au sein de l'académie rejetèrent la proposition de prix faite par Doppler, peut-être à l'instigation de Petzval.

JOSEPH PETZVAL DÉNIGRE LES IDÉES DE DOPPLER

D'autres ennuis dus à Petzval attendaient Doppler et son effet. Le 22 janvier 1852, lors d'une réunion de l'académie, Petzval lut un texte critiquant la théorie de Doppler. Lors d'une réunion ultérieure, le 21 mai 1852, une soixantaine de membres et d'invités étaient présents afin d'entendre les arguments des deux camps. La large assistance à ce simili-procès de l'effet Doppler contraste ironiquement avec les cinq membres de la Société de Bohême qui avaient pris connaissance des idées de Doppler pour la première fois dix ans plus tôt. Dans son intervention, qui fut publiée plus tard, Petzval attaquait la théorie de Doppler tant à propos du son que de la lumière.

Petzval était d'avis qu'aucune grande science ne pouvait émerger de quelques simples lignes d'algèbre : selon lui, tous les phénomènes naturels étaient les manifestations d'équations différentielles sous-jacentes. Partant de ce principe, il proposa un principe de conservation de la période d'oscillation dans les phénomènes ondulatoires. Bien qu'ayant quelque talent en tant que mathématicien, Petzval était un piètre philosophe de la nature. Il confondit une source et un récepteur en mouvement relatif avec une source et un récepteur immobiles dans un milieu en mouvement. Selon lui, les notes jouées par un orchestre bien accordé seraient tout aussi harmonieuses pour le public lors d'une journée agitée que lors d'une journée sans vent : les notes entendues ne seraient pas modifiées. Le philosophe et physicien autrichien Ernst Mach déclara plus tard que Doppler serait d'accord avec lui sur ce point, mais il ajouta que si ➤

> 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».

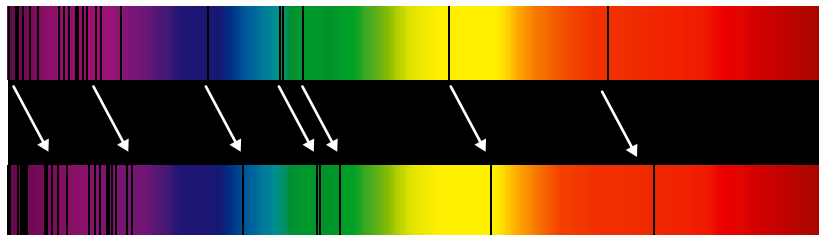
Dix jours plus tard, Doppler fut officiellement démis de ses fonctions de directeur de l'Institut de physique de Vienne et remplacé par Ettingshausen. Mais Doppler était déjà en route pour Venise, où il mourut de sa maladie quatre mois plus tard seulement.

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.

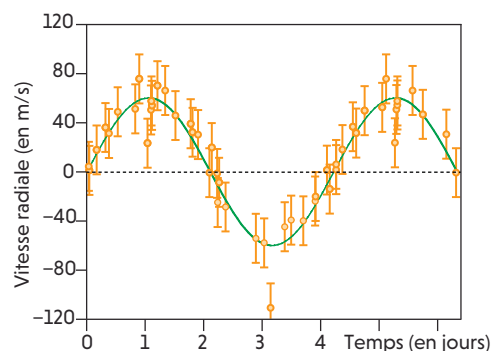
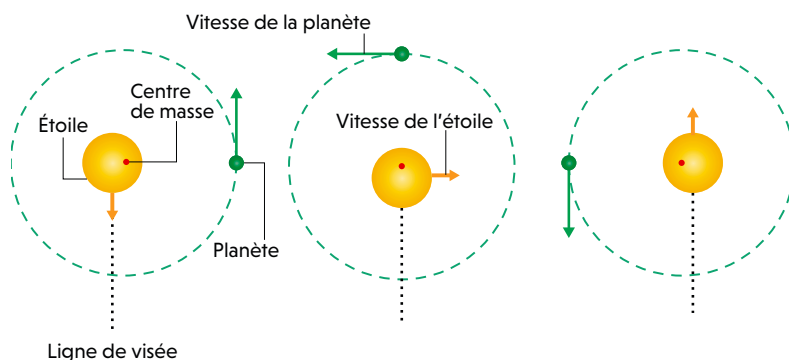
LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ S'IMMISCHE

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.



> mois avant la célèbre expérience de Michelson et Morley de 1887 qui était censée mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, et deux ans avant que l'Irlandais George FitzGerald ne propose, pour expliquer le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley, la contraction de la longueur des objets dans le sens de leur déplacement. L'approche de Voigt pour obtenir l'expression de l'effet Doppler est encore utilisée dans les manuels d'aujourd'hui.

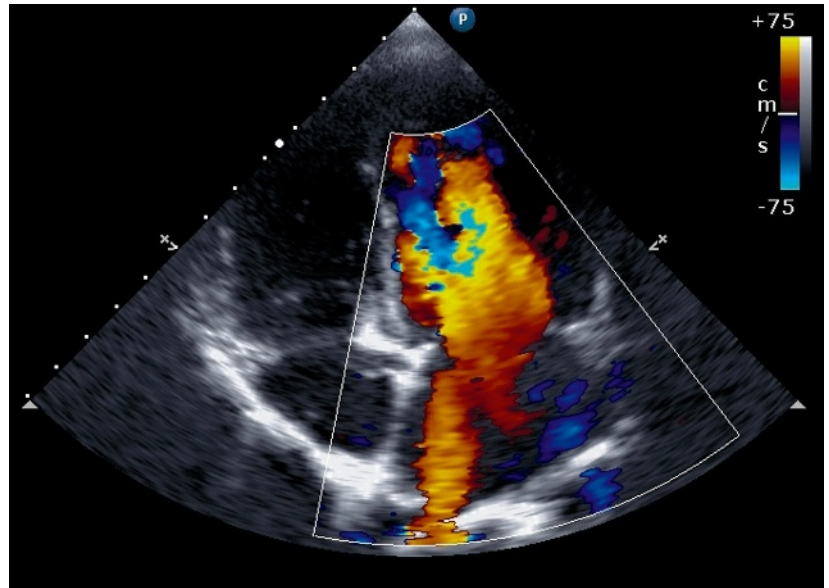
Vingt ans plus tard, Einstein compléta la description relativiste de l'effet Doppler en prédisant l'effet transversal, relatif à une source se déplaçant perpendiculairement à la ligne de visée d'un observateur. Cet effet n'avait été prédit ni par Doppler ni par Voigt.

UNE PLÉTHORE D'APPLICATIONS EN PHYSIQUE, ASTRONOMIE, MÉDECINE...

Près de deux siècles se sont écoulés depuis que Doppler a publié son idée simple fondée sur l'analogie avec un navire qui rencontre une série de vagues océaniques, et l'effet Doppler est aujourd'hui à la base des dispositifs les plus sensibles de mesure optique des systèmes dynamiques. Bien au-delà du radar Doppler des météorologistes, ses applications s'étendent des très petites échelles, avec le refroidissement Doppler des atomes en laboratoire, aux très grandes, avec les mesures par effet Doppler du mouvement d'oscillation des étoiles dans la recherche d'exoplanètes.

Jusqu'au lancement du satellite *Kepler* en 2008, la plupart des exoplanètes avaient été découvertes en détectant les décalages par effet Doppler dus à de petites variations de vitesse radiale lorsqu'une étoile et une exoplanète gravitent autour de leur centre de masse (voir la figure page 77). C'est de cette façon que Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, mirent en évidence en 1995 la première exoplanète, en orbite autour de l'étoile 51 Pegasi, ce qui leur a valu le prix Nobel de physique en 2019. On peut ainsi détecter des vitesses radiales aussi faibles que 3 mètres par seconde si on les mesure pendant de nombreuses années.

À plus grande échelle, les courbes donnant la vitesse des étoiles en fonction de leur distance au centre de leur galaxie fournissent parmi les preuves les plus convaincantes de l'existence de la matière noire, et on les obtient par spectroscopie Doppler. On détermine également les vitesses relatives des galaxies elles-mêmes grâce à l'effet Doppler. À une échelle encore plus grande, l'« effet Hubble » est un décalage vers le rouge de nature cosmologique, dû à l'expansion de l'espace plutôt qu'à un véritable effet Doppler. Mais la détermination de la vitesse de la Terre



par rapport au rayonnement du fond diffus cosmologique présent localement, soit 370 kilomètres par seconde, repose sur l'effet Doppler. Par ailleurs, les mouvements locaux dans l'Univers primitif ont conduit, par effet Doppler, à des fluctuations de petite échelle visibles dans le rayonnement du fond diffus cosmologique, anisotropie qui aide à caractériser la distribution de masse dans l'Univers primordial et la fraction qu'y représente la matière noire.

En biologie et en médecine, l'effet Doppler acoustique est utilisé en imagerie par ultrasons (l'échographie), la première démonstration ayant été faite dans les années 1960 pour la mesure du débit sanguin. L'imagerie Doppler des mouvements à l'intérieur du corps, notamment pour le contrôle de la santé cardiaque du fœtus dans le cadre des soins prénataux, est aujourd'hui une technique de routine. Quant à l'effet Doppler optique, il permet en tomographie optique de détecter les directions dans lesquelles le sang circule.

Par ailleurs, les mouvements à l'intérieur des cellules dans les tissus vivants produisent de faibles décalages Doppler, atteignant la dizaine de millihertz pour des vitesses de plusieurs nanomètres par seconde. Or la détection de subtils changements dans les vitesses intracellulaires pourrait aider les médecins à choisir les meilleurs traitements pour les patients atteints de cancer.

Ainsi, l'effet Doppler a permis à son découvreur d'atteindre une forme d'immortalité qu'il n'aurait jamais pu imaginer au moment où il quittait Vienne pour son dernier voyage en Italie – pendant qu'il regardait probablement le clocher de la cathédrale de Saint-Étienne s'éloigner avec un imperceptible décalage vers le rouge de quelques mégahertz. ■

L'échographie Doppler est aujourd'hui une technique d'imagerie médicale répandue, par exemple pour des examens cardiaques (comme sur cette image) ou pour visualiser la circulation sanguine dans les vaisseaux.

BIBLIOGRAPHIE

Z. Li et al., **Doppler fluctuation spectroscopy of intracellular dynamics in living tissue**, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 36(4), pp. 665-677, 2019.

H. Choi et al., **Biodynamic digital holography of chemoresistance in a pre-clinical trial of canine B-cell lymphoma**, *Biomed. Opt. Express*, vol. 9(5), pp. 2214-2228, 2018.

J. B. Hearnshaw, **The Analysis of Starlight : Two Centuries of Astronomical Spectroscopy**, Cambridge University Press, 2014.

P. M. Schuster, **Moving the Stars : Christian Doppler, His Life, His Works and Principle, and the World After**, Living Edition, 2005.

A. Eden, **The Search for Christian Doppler**, Springer, 1992.

AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

En cette année du 150^e anniversaire de la naissance de Jean Perrin, prix Nobel de physique, à l'origine de la création du Palais de la Découverte, le prix Jean Perrin 2019 sera décerné à Hélène Fischer, enseignante-chercheuse au sein de l'Institut Jean-Lamour, unité mixte de recherches Université de Lorraine/CNRS à Nancy.

Hélène Fischer est l'auteure de l'exposition *Magnétique* présentée au Palais de la découverte jusqu'en fin 2020. La remise de prix sera suivie de la conférence « Le magnétisme à l'épreuve de la médiation scientifique », par Hélène Fischer.

ORGANISÉ PAR



AVEC LE SOUTIEN DE

SCIENCE

remise du prix Jean Perrin

accès gratuit sur réservation

— 9 octobre à 19h



Palais
DÉCOUVERTE

AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

La spintronique succède à l'électronique en utilisant une propriété quantique de l'électron, le spin. Quels retours espérer de ces recherches dans le domaine du stockage des données ?

Stockage des données : l'ère de la spintronique
Hélène Fischer, enseignante chercheuse à l'institut Jean-Lamour, CNRS, université de Lorraine.

Stocker plus, plus vite et plus sobre
Stéphane Mangin, enseignant chercheur à l'institut Jean-Lamour, CNRS, université de Lorraine.

magnétisme : large champ de recherches

conférences

accès gratuit sur réservation

— 10 octobre à 14h

©23RF

AVEC LE SOUTIEN DE SCIENCE