

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.

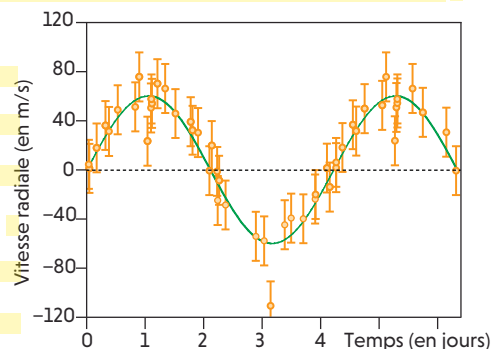
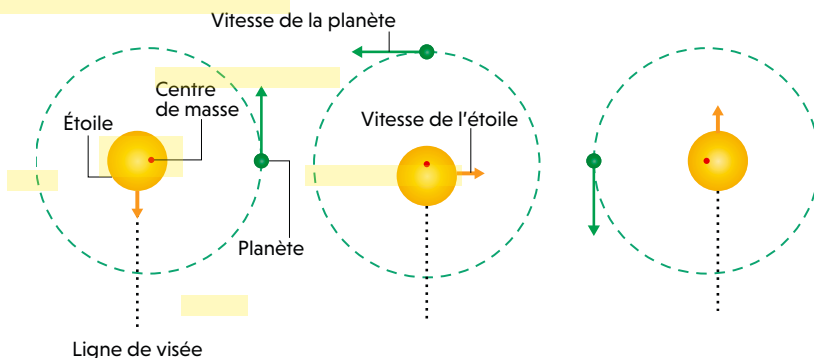
LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ S'IMMISCHE

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.

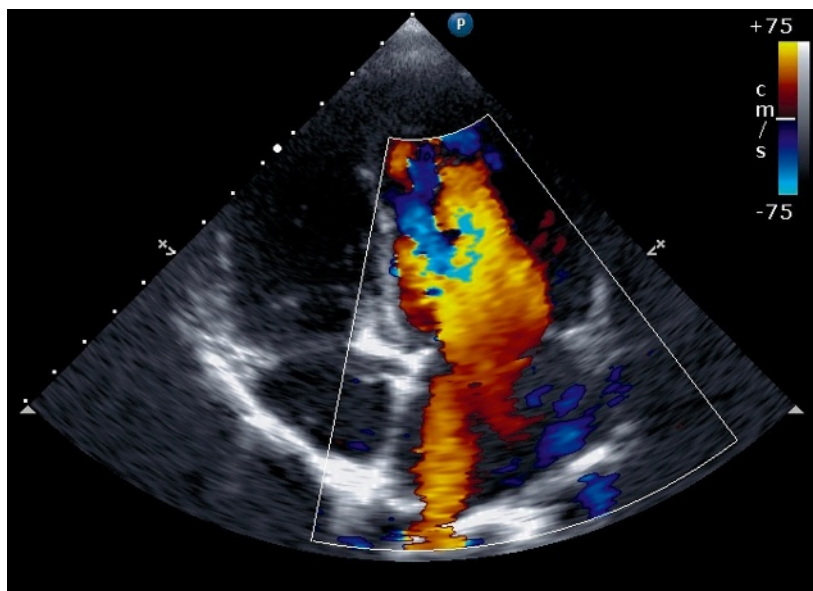
Vingt ans plus tard, Einstein compléta la description relativiste de l'effet Doppler en prédisant l'effet transversal, relatif à une source se déplaçant perpendiculairement à la ligne de visée d'un observateur. Cet effet n'avait été prédit ni par Doppler ni par Voigt.

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.