

> 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.

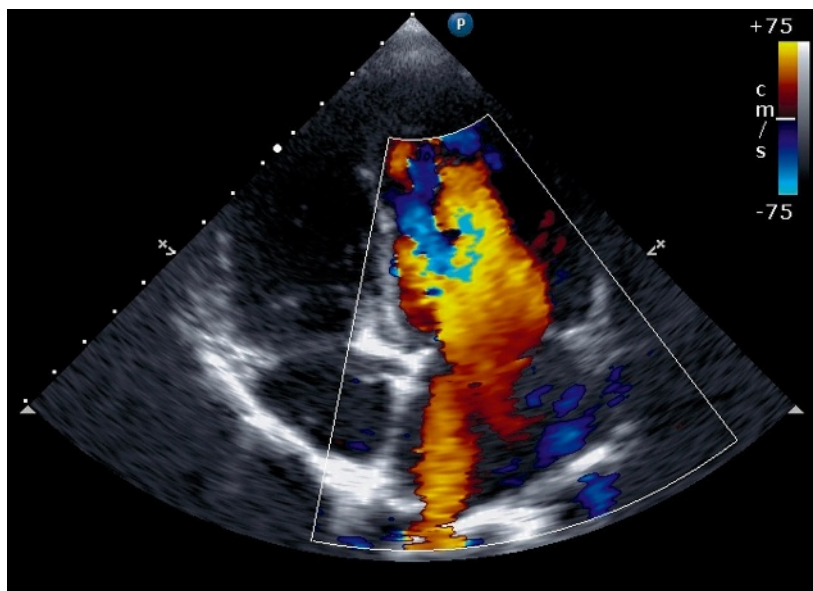
Vingt ans plus tard, Einstein compléta la description relativiste de l'effet Doppler en prédisant l'effet transversal, relatif à une source se déplaçant perpendiculairement à la ligne de visée d'un observateur. Cet effet n'avait été prédit ni par Doppler ni par Voigt.

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



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.

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. ■

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.