

> 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.

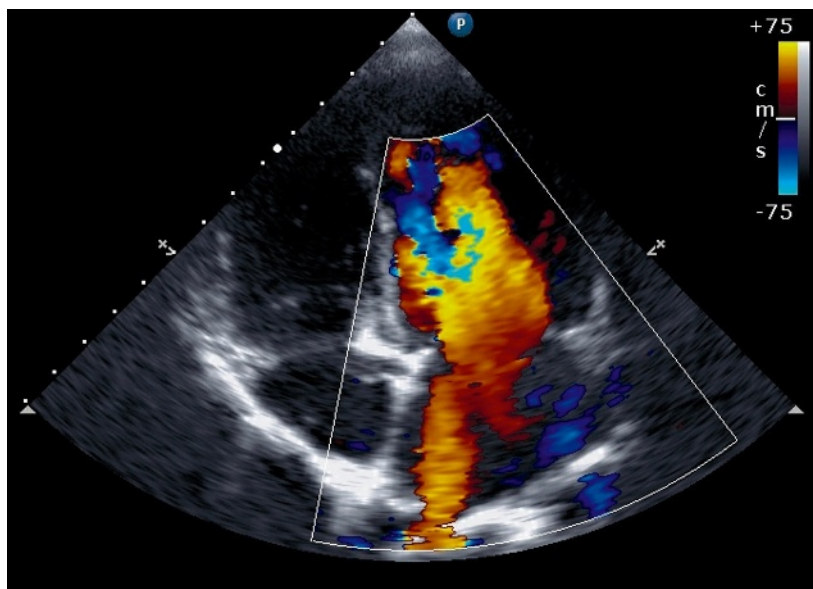
Vingt ans plus tard, Einstein compléta la description relativiste de l'effet Doppler en prédisant l'effet transversal, relatif à une source se déplaçant perpendiculairement à la ligne de visée d'un observateur. Cet effet n'avait été prédit ni par Doppler ni par Voigt.

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

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
 P.86 Art & science
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

DU FLOU ET DU FAUX EN MATHÉMATIQUES

Les mathématiques sont la plus précise et la plus exacte des sciences... Leur histoire nous montre pourtant de nombreux exemples d'erreurs importantes. Comment limiter les risques d'en produire d'autres?

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au
 laboratoire Cristal
 (Centre de recherche
 en informatique, signal
 et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

En voulant aller vite et aussi loin que possible, les mathématiciens prennent des risques qu'ils ne dominent pas toujours et qui les conduisent parfois à énoncer des théorèmes faux, ou des théorèmes vrais s'appuyant sur des démonstrations fausses. Avec la complexité croissante des domaines abordés, de nouvelles méthodes deviennent nécessaires pour traquer les erreurs.

UNE CRISE DE LA REPRODUCTIBILITÉ

Depuis une quinzaine d'années, divers journaux scientifiques de premier rang ont alerté sur le problème de la reproductibilité en science. En mai 2016, la revue britannique *Nature* publiait une étude où il apparaissait que 70 % des chercheurs qu'elle avait interrogés déclaraient avoir au moins une fois échoué en tentant de reproduire un résultat publié qui les intéressait.

Les mathématiques ne semblaient pas concernées; pourtant, vérifier une démonstration publiée est une forme de « reproduction ». Quand un chercheur propose un résultat et indique sa démonstration, il prétend disposer d'une argumentation le conduisant de manière certaine à la conclusion; lire et contrôler ses affirmations, c'est reproduire cette expérience mentale. Le problème de la reproductibilité concerne donc les mathématiques et on va voir qu'il y est particulièrement délicat.

On pourrait croire que tout mathématicien compétent peut lire tout article de mathématiques et vérifier les démonstrations qui y sont présentées. C'est faux pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la lecture d'un article mathématique exige souvent une bonne connaissance des concepts, définitions, résultats antérieurs et méthodes du sujet auquel il se rattache. Depuis que l'étendue des domaines mathématiques s'est considérablement accrue au xx^e siècle, chaque chercheur n'est compétent que pour une faible proportion des milliers d'articles de mathématiques publiés chaque année.

Il y a cependant une raison plus profonde qui rend difficile la vérification même pour un spécialiste: une démonstration n'est que l'indication plus ou moins détaillée d'un cheminement argumentatif, avec parfois des passages importants omis ou des raccourcis dangereux.

Pour lire étape par étape une démonstration, il faut ainsi: être très bien informé du domaine; être prêt à travailler longuement sur certains pas du raisonnement qui exigent des calculs non explicités ou le traitement de cas non détaillés; parfois aussi, programmer des vérifications par ordinateur car c'est inconcevable autrement; enfin, dans certains cas, être aussi génial que l'auteur, et en mathématiques il y a d'exceptionnels chercheurs aux capacités au-dessus de la moyenne qui n'ont pas conscience qu'il faut expliquer des points qui leur semblent évidents... et qui ne le sont que pour eux.

De cette situation, il résulte que de nombreuses erreurs sont commises, publiées et ignorées parfois assez longtemps. Plusieurs livres ont été consacrés aux erreurs en mathématiques, mais on réalise aussi des progrès sensibles pour contrôler et corriger les résultats les plus importants.