

L'EFFET Doppler, qui peut être considéré comme une « marque » du caractère ondulatoire d'une onde sonore ou électromagnétique, est évoqué, pour la dernière réforme en cours dans les lycées, en enseignement de spécialité de terminale, mais aussi cité pour ses applications médicales dans certaines spécialités de baccalauréats technologiques. En enseignement de spécialité de terminale, il s'agit : de décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler ; d'établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension ; d'exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques ; d'exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.

1. L'EFFET DOPPLER : QUELQUES RAPPELS

1.1. Historique

En 1842, l'Autrichien Christian Doppler (1803-1853) montre que la fréquence d'une oscillation sonore change quand la source ou l'observateur sont en mouvement. Il essaye ensuite, sans succès, d'appliquer son principe aux ondes lumineuses pour expliquer les différentes couleurs des étoiles, en particulier pour certaines étoiles doubles ; Hippolyte Fizeau en 1848 en donnera une interprétation correcte.

En 1845, l'Hollandais Christoph Hendrik Buys Ballot (1817-1890) démontre la validité du principe de Doppler pour les ondes sonores en constatant le changement de ton entendu quand des musiciens jouant des instruments à vent, embarqués sur un train sur la ligne Utrecht-Amsterdam, s'approchent puis s'éloignent de la gare.

1.2. Mise en évidence

Pour une mise en évidence probante, consulter cet excellent [site pédagogique Unisciel](#) qui offre de nombreuses ressources pour l'enseignant (cf. figure 1, page ci-après).

1.3. L'effet Doppler longitudinal non relativiste en acoustique

En lycée, on aborde le cas d'une source sonore, émettrice de fréquence propre f_E , qui se rapproche, ou s'éloigne, à la vitesse v , d'un observateur fixe.

- ◆ Si la source se rapproche de l'observateur, celui-ci perçoit une fréquence apparente f_R telle que :



Site » [Physique à Main Levée](#) » [Acoustique](#) » Effet Doppler avec un diapason



Effet Doppler avec un diapason

Un diapason électronique est attaché à une longue ficelle. Lorsqu'on le fait tourner à grande vitesse, le son qu'il émet n'a plus une fréquence constante : il est plus élevé lorsque le diapason se rapproche de la caméra, et plus grave s'il s'en éloigne. Ce phénomène, analogue à celui qu'on constate journalièrement au passage d'un véhicule muni d'une sirène, s'appelle « effet Doppler ».



Figure 1 - Mise en évidence de l'effet Doppler pour une onde sonore.

$$f_R = f_E \times \frac{1}{1 - \frac{v}{v_{son}}} \quad (1)$$

où v_{son} est la célérité des ondes sonores dans le milieu considéré. On a encore, en exprimant les longueurs d'onde de ces ondes mécaniques progressives :

$$(1) : \quad \lambda_R = \lambda_E \times \left(1 - \frac{v}{v_{son}}\right).$$

On observe donc $f_R > f_E$ et $\lambda_R < \lambda_E$.

- ◆ Si la source s'éloigne de l'observateur, celui-ci perçoit une fréquence apparente f_R telle que :

$$f_R = f_E \times \frac{1}{1 + \frac{v}{v_{son}}}$$

où v_{son} est la célérité des ondes sonores dans le milieu considéré. On a encore, en exprimant les longueurs d'onde de ces ondes mécaniques progressives :

$$(2) : \quad \lambda_R = \lambda_E \times \left(1 + \frac{v}{v_{son}}\right).$$

On observe donc $f_R < f_E$ et $\lambda_R > \lambda_E$.

Une animation probante est proposée sur ce site américain de l'Université de Pennsylvanie.

Source moving with $v_s < c$ (Mach 0.7)

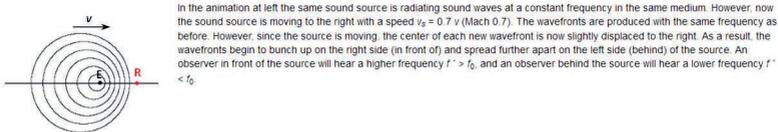


Figure 2 - Animation pour illustrer l'effet Doppler dans le cas d'une source subsonique.

Pour obtenir les relations (1) ou (2), on peut alors remarquer que l'observateur fixe « verrait » dans l'espace, suivant une direction joignant l'observateur à l'émetteur mobile (problème à une dimension), une « onde » se propageant à la vitesse invariante v_{son} qui remplirait l'espace avec une longueur d'onde apparente λ_R différente suivant que la source se rapproche ou s'éloigne de l'observateur.

- ◆ Si la source se rapproche de l'observateur, l'onde sonore perçue par l'observateur est située en avant de l'émetteur et sa longueur d'onde apparente est :

$$\lambda_R = \lambda_E - v \times T_E.$$

Remarquons que $\lambda_R = v_{son} \times T_R$ et $\lambda_E = v_{son} \times T_E$. On en tire : $\lambda_R = \lambda_E \times \left(1 - \frac{v}{v_{son}}\right)$ ou encore $T_R = T_E \times \left(1 - \frac{v}{v_{son}}\right)$, relations équivalentes à (1).

- ◆ Si la source s'éloigne de l'observateur, l'onde sonore perçue par l'observateur est située en arrière de l'émetteur et sa longueur d'onde apparente est $\lambda_R = \lambda_E + v \times T_E$.

On a toujours : $\lambda_R = v_{son} \times T_R$ et $\lambda_E = v_{son} \times T_E$. On en tire : $\lambda_R = \lambda_E \times \left(1 + \frac{v}{v_{son}}\right)$ ou encore $T_R = T_E \times \left(1 + \frac{v}{v_{son}}\right)$, relations équivalentes à (2).

- ◆ Remarquons encore que dans le cas où $v \ll v_{son}$, les relations (1) et (2) donnent, au premier ordre, le décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ selon la relation bien connue : $\frac{\Delta f}{f_E} \approx \pm \frac{v}{v_{son}}$ avec « + » si l'émetteur se rapproche de l'observateur et avec le signe « - » si l'émetteur s'éloigne de l'observateur.

1.4. L'effet Doppler en astrophysique : le redshift

Le déplacement vers les grandes longueurs d'onde des spectres d'émission d'éléments primordiaux comme l'hydrogène et l'hélium présents dans les nuages stellaires des galaxies met en évidence ce que l'on a appelé l'expansion de l'Univers, qui fait

que les galaxies s'éloignent les unes des autres avec une vitesse qui varie en raison de la distance qui les sépare à un instant donné. Le calcul des déplacements Doppler-Fizeau s'avère ici plus difficile qu'en acoustique et doit faire appel aux outils de la mécanique relativiste. L'effet Doppler longitudinal est décrit par une relation unique, que la relativité restreinte donne ainsi :

$$\lambda_R = \lambda_E \times \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

où v désigne la vitesse d'éloignement de la galaxie par rapport à un observateur terrestre fixe et c la célérité de l'onde lumineuse. Il suffit de substituer $+\beta$ par $-\beta$ et inversement si l'observateur et la source se rapprochent relativement l'un de l'autre. Cette relation respecte l'invariance de c , quel que soit le mouvement relatif de la source lumineuse. On a encore :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_E} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - 1 ;$$

le rapport $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_E}$ est appelé z par les astrophysiciens. Bien entendu, si $\frac{v}{c} \ll 1$, on retrouve l'expression classique de l'effet Doppler : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_E} \approx \frac{v}{c}$.

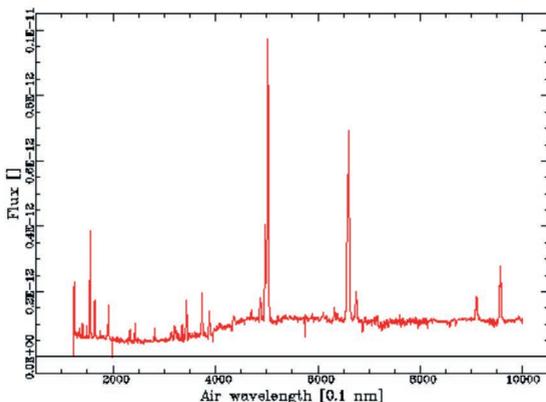
Pour un élève de terminale, l'intérêt est d'analyser des spectres d'émission de lumière issue de la galaxie étudiée, pour mettre en évidence le « *redshift* ». Le professeur trouvera de nombreuses banques de tels spectres sur des sites spécialisés, sachant que les données spectrales sont en général présentées dans des fichiers spécifiques au

FITS archive: FITS Pipeline processing

Display the spectrum

File identification and executed pipeline: fa:L1996KINN/00017&z=vs

Coord=10188; 7.0e-13



in wavelength range to [0.1 nm]

Figure 3 - Spectre de l'hydrogène de la galaxie M77.

format FITS (*Flexible Image Transport System*), exploitables par certains tableurs comme Regressi par exemple pour nos élèves. À noter que dans la plupart de ces sites, les spectres peuvent être directement affichés dans une visionneuse incorporée, ce qui facilite leur lecture. Une de ces bases de données les plus connues est celle fournie par [HyperLeda](#).

Pour la galaxie ici décrite (M77) (cf. figure 3, page ci-contre), on relève que la raie $H\alpha$ à 656 nm de l'hydrogène est perçue sur Terre à 661 nm.

2. RESSOURCES DE QUELQUES SITES INSTITUTIONNELS

Les programmes en cours en spécialité de terminale permettent d'utiliser les très nombreuses activités qui avaient accompagné les précédents programmes élaborés en 2012-2013.

- ◆ En voici un exemple toujours d'actualité. **Dans cette fiche**, tous les fondements relatifs à ce qu'un élève de terminale doit acquérir sont passés en revue, avec aussi la description de quelques dispositifs expérimentaux et l'utilisation de logiciels courants comme **Audacity**[®] pour les acquisitions des pistes sonores.

ACADÉMIE DE VERSAILLES | Physique - Chimie

Liberté
Égalité
Fraternité

Accueil > Lycée > Voie générale > Archives > Terminale S > Ressources > Observer > L'effet Doppler

L'effet Doppler

dimanche 25 novembre 2012, par David Latouche

Christian Doppler

Hippolyte Fizeau

Figure 4 - Effet Doppler référencé dans Edubase.

- ◆ Pour l'actuelle réforme, **une proposition** disponible. Cette fiche aborde la problématique de l'écholocation en liaison avec l'effet Doppler.
- ◆ Pour l'imagerie médicale et l'effet Doppler en **section ST2S** (Sciences et technologies de la santé et du social).

- ◆ Il existe bien d'autres exemples que l'on trouvera aisément sur [Édubase](#).
- ◆ Les canaux YouTube offrent également de très nombreuses présentations filmées pour illustrer l'effet Doppler avec des qualités très inégales. Nous ne citerons pas d'exemples ici, tant la vidéothèque sur cette thématique est mouvante !

3. VU DANS *LE BUP* : ONDES ET EFFET DOPPLER

Dans cette rubrique, nous citons quelques articles récents du *Bup* qui apportent un éclairage utile sur l'historique, les fondements et les applications de l'effet Doppler pour les ondes acoustiques ou électromagnétiques. Nous n'avons retenu que les articles qui nous paraissent les plus accessibles à un public non spécialiste et, si possible, les moins calculatoires. Chaque article sélectionné est référencé, avec un court résumé de présentation.

- ◆ Pierre Jammaron, «Effet Doppler», *Bull. Un. Phys.*, vol. 89, n° 776, p. 1319-1322, juillet-août-septembre 1995.
L'effet Doppler apparaît dans les programmes de l'option Sciences expérimentales de première S. Les expériences décrites, qui utilisent les ultrasons, permettent une étude plus précise de ce phénomène.
- ◆ Jean-Claude Pivot, «L'effet Doppler en option Sciences expérimentales», *Bull. Un. Phys.*, vol. 90, n° 780, p. 121-127, janvier 1996.
La séance commence par la présentation d'un enregistrement sonore, celui d'une voiture klaxonnant en permanence à l'arrêt – moteur coupé – puis à différentes allures... Il suffit de promettre qu'à l'issue de la séance, on aura retrouvé la vitesse de la voiture à partir du document sonore, pour que l'étude théorique soit moins douloureuse.
- ◆ Stéphan Lampert, «L'effet Doppler dans les nouveaux programmes de terminale S», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 107, n° 954, p. 615-633, mai 2013.
Dans cet article, on s'intéresse à l'effet Doppler acoustique mettant en œuvre des capteurs piézoélectriques à ultrasons ainsi que des interfaces d'acquisition couramment utilisées dans l'enseignement secondaire. La simplicité de la manipulation permet de la proposer en TP-élève dans le cadre des nouveaux programmes de terminale S. Le changement de fréquence est ainsi mis en évidence par un traitement de Fourier. Une confrontation aux résultats issus d'un enregistrement vidéo simultané ainsi qu'une discussion sur les incertitudes de la manipulation sont ensuite menées afin de critiquer la méthode utilisée.
- ◆ Yves Baima, André Jorandon, Sylvie Morlen et Marc Vincent, «Changement de fréquence, effet Doppler», *Bull. Un. Phys.*, vol. 92, n° 804, p. 869-884, mai 1998.
La propagation des ondes est une part importante du programme de physique de CPGE (Classe préparatoire aux grandes écoles). C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude de l'effet Doppler sous forme de travaux pratiques. Dans une première partie, nous présentons de façon sommaire l'effet Doppler, dans la configuration la plus simple où la source d'ondes est mobile et le récepteur fixe dans le référentiel du laboratoire. À la suite de ceci, on trouvera une descrip-

tion du dispositif expérimental mis au point au lycée. Il met en jeu l'utilisation d'un émetteur et d'un récepteur d'ondes ultrasonores et de l'oscilloscope numérique utilisé pour visualiser les signaux.

- ◆ Fouad Lahmidani et Nicolas Schlosser, « Mesure d'une vitesse instantanée par effet Doppler », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 973, p. 557-567, avril 2015.
Cet article décrit une expérience utilisant l'effet Doppler pour mesurer la vitesse instantanée d'un chariot accéléré, roulant sur un plan. L'idée générale est de mesurer le décalage Doppler de la fréquence de l'onde ultrasonore issue d'un émetteur lié au chariot mobile en réalisant des battements avec l'onde issue d'un émetteur fixe. Deux autres méthodes de mesure de la vitesse permettent de vérifier les résultats obtenus. Après une description détaillée du protocole et des difficultés expérimentales rencontrées, nous présentons les résultats obtenus avant de conclure sur la validité de cette méthode de mesure d'une vitesse instantanée.

- ◆ Guy Bouyrie, « L'arpenteur du web : ondes sonores, de l'écho au mur du son », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 110, n° 985, p. 859-902, juin 2016.
Nous illustrerons ici, au moyen des ressources disponibles sur Internet, les principaux phénomènes observés lors de la propagation du son, dans l'air « libre » ou dans un volume fini, qui peuvent être évoqués dans la scolarité d'un lycéen scientifique : effet Doppler-Fizeau, « mur du son », écho, réfraction d'une onde sonore, interférences, absorption d'une onde sonore... Nous ne manquerons pas de faire appel à l'histoire des sciences pour montrer comment les modèles qui rendent compte du « son » ont pu évoluer.

- ◆ Jean-Marie Greuet et Jean-Pierre Lemoine, « Vitesse de phase, dispersion, effet Doppler, pour des ondes à la surface de l'eau », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98 n° 864, p. 705-716 mai 2004.
Le but de cet article est d'essayer de montrer que l'étude de la propagation d'une onde à la surface de l'eau par un enregistrement en continu (sans utiliser de webcam, assez mal adaptée à l'étude de phénomènes périodiques de fréquence voisine de celle de la caméra), avec du matériel existant déjà dans les collections des lycées, peut être intéressante à exploiter. Après avoir mesuré la célérité (vitesse de phase) d'une onde puis mis en évidence la dispersion, il est proposé un montage permettant de mettre en évidence l'effet Doppler et d'effectuer quelques mesures.
Cet article est complété par des considérations théoriques sur les notions de vitesse de phase et de vitesse de groupe en milieu dispersif par l'annexe :
 - Luc Dettwiller, « Formule de l'effet Doppler en milieu dispersif », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98 n° 864, p. 717-719, mai 2004.

- ◆ Guy Bouyrie, « Spectres stellaires et fichiers FITS », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 107, n° 956, p. 715-731, juin-juillet-août-septembre 2013.
La mise sur le marché de nombreuses caméras à capteurs CCD ou CMOS a révolutionné la spectroscopie stellaire. Ces techniques désormais éprouvées ont permis de constituer de vastes bases de données qu'il est particulièrement intéressant de parcourir avec nos élèves de lycée, notamment pour illustrer l'effet Doppler-Fizeau ou la loi de Wien. Pour que cette étude soit menée en travaux dirigés, il faut un accès Internet et un logiciel capable de dépouiller les fichiers

au format FIT qui permettent de stocker les données acquises. Cet article se propose de montrer comment on peut procéder pour arriver à cette exploitation susceptible d'être menée avec des élèves de terminale.

- ◆ René Mélin, « Principe du vélocimètre sanguin à effet Doppler : réflexion des ultrasons et effet Doppler », *Bull. Un. Phys.*, vol. 88, n° 761, p. 325-332, février 1994.
L'auteur, après avoir rappelé la définition de l'effet Doppler et ses conséquences fréquentielles, explique le principe du vélocimètre sanguin. Il propose ensuite un dispositif expérimental permettant de mesurer une vitesse à partir d'une variation de fréquence, et donc de vérifier la relation fondamentale de l'effet Doppler.
- ◆ André Deiber, Olivier Kempf et le groupe GRESEP, « Mesure de très faibles vitesses instantanées par échographie Doppler », *Bull. Un. Phys.*, vol. 91, n° 798, p. 1925-1942, novembre 1997.
Une recherche bibliographique, la consultation de diverses bases de données (Internet entre autres) ainsi qu'une enquête auprès du milieu médical nous ont permis de dégager les grandes lignes de fonctionnement des sondes Doppler en ultrasonographie vasculaire utilisée dans un domaine particulier de la médecine, l'imagerie vasculaire. Par la suite, ces principes ont été transposés à la mesure de la vitesse d'objets se déplaçant lentement suivant un protocole aisé à mettre en œuvre, ne requérant que du matériel peu onéreux.
- ◆ Laurence Poncet, « Vélocimétrie laser à effet Doppler », *Bull. Un. Phys.*, vol. 90, n° 782, p. 571-588, mars 1996.
Principe de la vélocimétrie laser à effet Doppler ; relation entre vitesse et fréquence du signal ; exemples de manipulations : mouvement d'un solide, mesure de la vitesse de rotation, application à la mécanique des fluides.
- ◆ François Vandenbrouck, Muriel Dunlop et Alain Le Rille, « Détection interférométrique de mouvements », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 107, n° 951, p. 185-195, février 2013.
Nous présentons dans cet article un protocole expérimental simple permettant l'étude précise de mouvements (amplitude de déplacement et vitesse), fondé sur une méthode interférométrique. Le dispositif est essentiellement constitué d'un interféromètre de Michelson, éclairé en ondes centimétriques, dont un des deux miroirs est mobile. Nous présentons deux applications : l'étude du mouvement d'un chariot mobile par vélocimétrie à effet Doppler et l'étude complète de la réponse harmonique d'un haut-parleur électrodynamique.
- ◆ Gérard Llapasset, « Mesure de la vitesse d'un objet en chute "libre" », *Bull. Un. Phys.*, vol. 93, n° 811, p. 309-314, février 1999.
Le montage décrit ci-après utilise l'effet Doppler ultrasonore, qui a déjà fait l'objet d'un excellent article dans Le Bup n° 798 de novembre 1997, suivi d'une conversion fréquence/tension qui permet d'accéder à la vitesse du mobile qui est « libre », c'est-à-dire seulement soumis à la pesanteur et aux forces de frottement de l'air (pas de fil électrique, pas de ficelle, pas de contact avec une solution électrolytique...).
- ◆ Julien Barthes et Pascal Langlois, « Une imprimante recyclée pour les ultrasons »,

Bull. Un. Prof. Phys. Chim., vol. 106, n° 943, p. 441–450, avril 2012.

Le chariot d'une imprimante à jet d'encre est récupérable pour effectuer une plateforme d'expériences avec des ondes ultras sonores. Avec un peu de bricolage, cette plateforme constituée à bas coût permet une étude automatisée de l'effet Doppler. On peut également l'utiliser pour étudier des interférences soit dans le but de mesurer la vitesse du son, soit pour illustrer une expérience de type Fentes d'Young.

- ◆ Robert Fleckinger, « Les décalages en fréquence : une préparation unifiée », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 110, n° 983, p. 459–468, avril 2016.
Cet article présente, d'une façon unifiée centrée sur le phénomène de propagation, les divers effets de décalage de la fréquence d'un signal dus aux conditions d'émission, de propagation et de réception entre un émetteur et un récepteur. Un traitement identique dans lequel on exprime indépendamment le chemin parcouru par un front d'onde entre son émission et sa réception et la durée de cette propagation pour deux fronts d'onde successifs permet d'obtenir la relation entre les fréquences émises et reçues. Sont traités successivement l'effet Doppler acoustique, l'effet Doppler-Fizeau relativiste, le décalage gravitationnel et « le redshift cosmologique z ».
- ◆ Jean Sivardière, « Ressemblances et différences cruciales entre systèmes physiques », *Bull. Un. Phys.*, vol. 96, n° 848, p. 1509–1519, novembre 2002.
Certains systèmes physiques présentent des « ressemblances » sans nécessairement être représentables par le même formalisme : la recherche de leurs différences est un exercice pédagogique utile. Exemples : Polygone et polyèdres réguliers ; Pavages du plan et de la sphère ; Courbes et surfaces ; Angle plan et angle solide ; Mouvement harmonique et mouvement képlérien ; Effet Doppler et effet Doppler-Fizeau.
- ◆ Jean-Luc Leroy-Bury et Laurence Viennot, « Doppler et Römer : physique et mathématique à l'œuvre », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 97, n° 859 (1), p. 1595–1611, décembre 2003.
L'effet Doppler intervient dans un nombre considérable de domaines, et se présente comme un sujet très riche pour des projets de recherche personnelle, TPE (Travaux personnels encadrés) en première et terminale, TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés) en classes préparatoires, ceci alors qu'il est peu enseigné même au niveau universitaire. Ce manque relatif dans l'enseignement classique et la richesse potentielle du thème incitent à l'explorer dans des cadres moins académiques, et au carrefour de plusieurs disciplines. Cet article appuie tout particulièrement l'idée d'un double éclairage, mathématique et physique. Il s'agit de donner un exemple de thème de travail articulé entre ces deux disciplines, qui mène à des conclusions intéressantes, notamment parce qu'il donne du sens entre autres aux notions de périodicité, de vitesse et de célérité, de fonction linéaire, de changement de variable, de pente, de tangente, d'algébrisation (des déplacements et vitesses). De plus, cet exemple associe de manière originale l'effet Doppler et la découverte de Römer sur le caractère fini de la vitesse de la lumière.
- ◆ Jean Eisenstaedt, « De Newton à Einstein : l'optique oubliée des corps en mouvement », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 102, n° 909 (1), p. 1353–1368, décembre 2008.
Depuis Galilée, la relativité du mouvement est un élément central de la physique. Mais com-

ment s'applique-t-elle à la lumière ? À la fin du XVIII^e siècle, la théorie newtonienne de la propagation de la lumière, une extension naturelle des Principia, fut développée, mais vite oubliée. Une série de travaux compléta les Principia non seulement avec la formulation d'une optique relativiste des corps en mouvement, mais aussi grâce à la découverte – quelque soixante ans avant Doppler – de l'analogue de l'effet Doppler-Fizeau, ainsi qu'à d'autres effets et idées qui forment un préambule fascinant à la relativité d'Einstein.