FORCES PRODUITES PAR DES FAISCEAUX LASER : FORCES OPTIQUES ET PHOTOPHORESE.

G. Gouesbet[1], V. de Angelis[2], L.A Ambrosio[2] et J. Wang[3]

1.Université de Normandie et INSA de Rouen, CNRS, Coria. France
2. Université de Sao Paulo, Brésil.
3.Université de Xidian, Chine.
*Courriel de l'orateur : gouesbet@coria.fr

RESUME

Les faisceaux laser exercent des forces sur des particules, notamment les forces optiques et les forces de photophorèse. Nous ferons le point sur les forces optiques dans le cadre de la théorie de Lorenz-Mie généralisée (GLMT en anglais), en particulier sur la mise en évidence de forces non-standard qui ont échappé à la classification habituelle. Les forces de photophorèse, quant à elles, doivent être prises en compte dans le cas de particules absorbantes car, pouvant être plus grandes par plusieurs ordres de grandeur que les forces optiques, elles peuvent jouer un rôle important dans la gestion des pincettes optiques connues depuis Ashkin. On rappelle que ces pincettes optiques, en particulier, permettent des études fines des propriétés de diverses espèces de particules, dont les aérosols.

ABSTRACT

Laser light exerts forces on particles, in particular optical forces and photophoretic forces. We shall review optical forces in the framework of the generalized Lorenz-Mie theory, including non-standard forces which are not considered in the usual categorization. Another kind of forces generated by light concerns photophoretic forces when the illuminated particle is absorbing. These forces may be larger than optical forces by orders of magnitude and therefore may play a significant role when using optical tweezers described by Ashkin. It is here to be recalled that optical tweezers allow one to study the characteristics of trapped particles, in particular aerosols.

MOTS-CLÉS : forces optiques,forces non-standard, phophorèse, théorie de Lorenz-Mie généralisée.
KEYWORDS : optical forces, non-standard forces, photophoretic forces, generalized Lorenz-Mie theory.

1. FORCES OPTIQUES.

Les expressions générales des forces optiques exercées par des faisceaux laser sur des particules sphériques sont connues depuis plusieurs décennies grâce à la théorie de Lorenz-Mie généralisée (GLMT en anglais), dans un cadre où elles sont décomposées en forces de mélange et forces de recul [1]-[2], bien que n'utilisant pas à l'époque cette terminologie . Par ailleurs, les travaux d'Arthur Ashkin ont rendu célèbre la catégorisation des forces optiques en termes de forces de gradient et de forces de diffusion dans un contexte où la structure des faisceaux n'est pas prise en compte de manière détaillée, en particulier à propos de la manipulation et du piégeage de petites particules, plus particulièrement grâce à la découverte des pincettes optiques [3]-[4]. Jusqu'à récemment, la seule étude confirmant la décomposition des forces optiques en termes de forces de gradient et de forces de diffusion dans le cadre de la GLMT était due à Lock en 2004 [5] dans le cas de faisceaux gaussiens faiblement focalisés.

Nous passerons alors en revue les travaux systématiques menés depuis 2019 pour catégoriser et décomposer les forces optiques dans le cadre de la GLMT, en commençant par l'étude des particules de Rayleigh, plus généralement de dipôles électriques [6]-[7], puis en continuant avec le cas de particules magnétodiélectriques (dipôles à la fois électriques et magnétiques) [8], en poursuivant avec le cas de quadrupôles [9] pour finir avec le cas le plus général de particules de taille arbitraire [10].

Les résultats les plus marquants sont les suivants :

1°) Les forces de non-gradient (forces non-conservatives) ne s'identifient pas, en général, aux forces de diffusion malgré une opinion commune, et malgré les résultats de Lock [5]. Elles doivent être au contraire décomposées en forces de diffusion (définies comme étant proportionnelles au vecteur de Poynting) et en forces non-standard (FNS). Les FNS étaient inconnues d'Ashkin et passèrent inaperçues dans le travail de Lock à cause de son hypothèse de faisceaux faiblement focalisés. Mais elles se révèlent en particulier dans le cas de faisceaux gaussiens qui ne sont pas faiblement focalisés, et dans le cas de faisceaux de Bessel, entre autres.

2°) Les résultats de la GLMT, quand ils sont réduits au cas des dipôles, s'identifient avec les résultats obtenus dans la théorie des forces dipolaires [11]-[15] mais (a) le dictionnaire formel utilisé pour désigner les différentes composantes de forces n'est pas le même dans les deux théories et (b) tandis que la théorie dipolaire exprime ses résultats en termes de champs globaux, la GLMT n'utilise que des ondes partielles d'ordre 1 et 2. En d'autres termes, la théorie dipolaire utilise un nombre infini de termes superflus car de contribution totale identiquement nulle.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32951 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

Au total, les forces optiques peuvent se partitionner en utilisant trois niveaux de catégories (1) forces de mélange et forces de recul (2) forces de gradient (c'est-à-dire forces conservatives) et forces de non-gradient (c'est-à-dire forces non-conservatives) et (3) forces de diffusion (qui sont des forces non-conservatives qui sont proportionnelles au vecteur de Poynting) et forces non-standard (qui sont des forces non-conservatives qui ne sont pas proportionnelles au vecteur de Poynting). Parallèlement à cette décomposition en trois catégories, on peut introduite une décomposition en deux niveaux (1) en isolant les forces associées à différents ordres d'ondes partielles et (2) en distinguant les forces purement électriques, les forces purement magnétiques, et les forces mixtes magnétoélectriques.

Chaque type de force est exprimé de manière analytique en fonction des coefficients de forme de la GLMT qui encodent la structure des faisceaux incidents, et des coefficients de Mie qui encodent les propriétés du diffuseur. Les expressions obtenues s'appliquent donc à n'importe quel type de lasers par l'intermédiaire des coefficients de forme. Par ailleurs, bien que la GLMT originelle (GLMT dite au sens strict) s'applique à des particules sphériques homogènes, les expressions obtenues s'appliquent également aux particules sphériques multi-couches, aux agrégats de particules sphériques, ou aux particules sphériques contenant des inclusions sphériques excentriques, moyennant une réinterprétation des coefficients de Mie.

2. FORCES DE PHOTOPHORESE.

Néanmoins, un autre type de forces (dont l'origine réside là encore dans son éclairement) doit être pris en compte dans le cas de particules absorbantes, lorsqu'on manipule des particules avec des lasers, particulièrement lorsqu'on s'intéresse au piégeage par des pincettes optiques, nommément les forces de photophorèse. Le processus fondateur de ces forces est le suivant : quand une particule absorbante est éclairée, un gradient de température apparaît à la surface de la particule du fait de l'éclairage qui produit un champ de température inhomogène à l'intérieur de la particule. Un transfert inhomogène par quantité de mouvement entre la particule et le fluide environnant produit alors des forces de photophorèse qui peuvent être vues, en quelque sorte, comme une thermophorèse induite.

Dans le cas de particules sphériques, la GLMT a pu être appliqué récemment au calcul des forces de photophorèse [16]-[22]. Bien que l'étude de la photophorèse induite par laser soit récente, ce phénomène ne devrait pas être négligé lorsque l'on sait que les forces de photophorèse peuvent être supérieures aux forces optiques par des ordres de grandeur [23]-[25].

[1] G. Gouesbet, B. Maheu et G. Gréhan. Light scattering from a sphere arbitrarily located in a Gaussian beam, using a Bromwich formulation. Journal of the Optical Society of America A, 5, 9, 1427-1443, 1988.
[2] G. Gouesbet et G. Gréhan. Generalized Lorenz-Mie theories, second edition. Spirnger International Publishing AG, 2017.
[3] A. Ashkin. Optical trapping and manipulations of neutral particles using lasers: A reprint volume with commentaries. World Scientific, Singapore, 2006.
[4] G. Gouesbet. Generalized Lorenz-Mie theories and mechanical effects of laser light, on the occasion of Arthur Ashkin's receipt of the 2018 Nobel prize in physics for his pioneering work in optical levitation and manipulation: A review. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 225, 258-277, 2019.
[5] J.A. Lock. Calculation of the radiation trapping force for laser tweezers by use of generalized Lorenz-Mie theory. II. On-axis trapping force. Applied Optics. 43, 12, 2545-2554, 2004.
[6] G. Gouesbet. Gradient, scattering and other kinds of longitudinal optical forces exerted by off-axis Bessel beams in the Rayleigh regime in the framework of generalized Lorenz-Mie theory. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 246. Article 106913. 2020.
[7] G. Gouesbet and L.A. Ambrosio. Axicon optical forces and other kinds of transverse optical forces exerted by off-axis Bessel beams in the Rayleigh regime in the framework of generalized Lorenz-Mie theory. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 258, Article 107356, 2021.
[8] G. Gouesbet. V.S. de Angelis and L.A. Ambrosio. Optical forces and optical forces categorizations on small magnetodielectric particles in the framework of generalized Lorenz-Mie theory. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 279. Article 108046. 2022.
[9] G. Gouesbet, V.S.de Angelis and L.A. Ambrosio. Optical forces and optical forces categorizations exerted on quadrupoles in the framework of generalized Lorenz-Mie theory. Submitted to Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.
[10] G. Gouesbet, V.S. de Angelis and L.A. Ambrosio. Optical forces and optical forces partitions exerted on arbitrary sized spherical homogeneous particles in the framework of generalized Lorenz-Mie theory. Submitted to Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.
[11] L.A. Ambrosio and G. Gouesbet. On longitudinal radiation pressure cross-sections in the generalized Lorenz-Mie theory and their numerical relationship with the dipole theory of forces. Journal of the Optical Society of America B, 38, 3, 825-833, 2021.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32951 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

[12] L.A. Ambrosio and G. Gouesbet. On transverse radiation pressure cross-sections in the generalized Lorenz-Mie theory and their numerical relationship with the dipole theory of forces. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 261. Article 107491. 2021.
[13] L.A. Ambrosio and G. Gouesbet. On the Rayleigh limit of the generalized Lorenz-Mie theory and its formal identification with the dipole theory of forces. I. The longitudinal case. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 262, Article 107591, 2021.
[14] L.A. Ambrosio and G. Gouesbet. On the Rayleigh limit of the generalized Lorenz-Mie theory and its formal Identification with the dipole theory of forces. II. The transverse case. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 266. Article 107591. 2021.
[15] L.A. Ambrosio, V.S. de Angelis and G. Gouesbet. The generalized Lorenz-Mie theory and its identification with the dipole theory of forces for particles with electric and magnetic properties. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 281. Article 108104. 2022.
[16] L.A. Ambrosio. Photophoresis in the slip-flow and free molecular regimes for arbitrary-index particles. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. Virtual Special Issue of LIP2020, 255, Article 107276, 2020.
[17] L.A. Ambrosio. Generalized Lorenz-Mie theory in the analysis of longitudinal phorophoresis of arbitrary-index particles: on-axis axisymmetric beams of the first kind. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 275. Article 107889. 2021.
[18] H. Wang, J. Wang, W. Dong, Y. Han, L.A. Ambrosio and L. Lin. Theoretical prediction of photophoretic force on a dielectric sphere illuminated by a circularly symmetric high-order Bessel beam: on-axis case. Optics Express. 29, 17, 26894-26908, 2021.
[19] L.A. Ambrosio, J. Wang,and G. Gouesbet. Towards photophoresis with the generalized Lorenz-Mie theory. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 288. Article 108266. 2022.
[20] Y. Sun, J. Wang, Q. Yu, H. Wang, P. Briard, L.A. Ambrosio and G. Gouesbet. Longitudinal and transverse photophoretic force on a homogeneous sphere exerted by a Bessel beam with selective polarization. Applied Optics. 61, 26, 7632-7643.2022.
[21] L. Liu, J. Wang, P. Briard, L.A. Ambrosio and G. Gouesbet. Phophoretic force on an absorbing sphere illuminated by a Gaussian beam. In “Book of extended abstracts, 13th International Conference Series on Laser-light and Interactions with particles. Optical Particle Characterization Follow-up (LIP2022). http://lip-conference/org/, August 21-26th, 2022, Warsaw, Poland.
[22] L. Liu, C. Zhao, C. Wang, L.A. Ambrosio, G. Gouesbet and J. Wang. Photophoretic force on an absorbing sphere illuminated by a fundamental Gaussian beam. Submitted to Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.
[23] G.H. Chen, L. He, M.-Y. Wu and Y.-Q.Li, Temporal dependence of photophoretic force optically induced on absorbing airborne particles by a power-modulated laser. Physical Review Applied. 10, 5, Article 054027. 2018.
[24] T.X. Phuoc. A numerical study of the radiation forces on an absorbing particle using the ray optics approach. Optics Communications. 241, 4-6, 271-277, 2004.
[25]V.G. Shedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, W. Krolokowski, V.S. Kivshar. Optical guiding of absorbing nanoclusters in air. Optics Express. 17, 7, 5743-5747, 2009.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32951 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs