



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



Polariton physics / Physique des polaritons

Foreword – Strong light–matter coupling in solid-state systems: A historical perspective



The possibility of engineering solid-state systems mixing light and matter excitations has opened a new era in the manipulation of photons. The strong coupling regime appears when the exchange of energy between matter and the light field, which is usually confined in a cavity, overcomes the losses. The resulting new eigenstates, named polaritons, combine light and matter properties. From their photonic component, polaritons can be manipulated and detected using standard optical techniques, while from the matter part they inherit spectacular nonlinear properties.

Following early studies with atoms in the microwave domain [1,2], the field of polaritons at optical frequencies has seen his factual birth in 1992 with seminal works in two different systems: the group of Kimble at Caltech [3] demonstrated the strong coupling of a single atom in an optical cavity while, simultaneously, Weisbuch and co-workers at the University of Tokyo [4] observed normal-mode splitting between a photonic Fabry–Pérot mode of a GaAs-based semiconductor microcavity and the excitonic resonance of a quantum well embedded in it. The publication of the latter paper quickly triggered the interest of the semiconductor community, as evidenced in Fig. 1, which shows the number of published papers containing the words “microcavity” and “polariton” in their title or abstract.

One of the most interesting predictions in the field of microcavity polaritons is that thanks to the low effective mass – inherited from the photonic component –, and to their bosonic character in the dilute regime, microcavity polaritons should be able to form Bose–Einstein condensates at elevated temperatures. This idea was put forward in 1996 by A. Imamoglu and collaborators [5], and it was experimentally demonstrated in 2006 [6], inaugurating a new era of experiments on interacting quantum fluids of light using semiconductor microcavities. Since then, a number of experiments have tackled problems like superfluidity, the nucleation of quantized vortices and solitons, long-range coherence, and the study of polariton fluids in lattices.

The first decade of the years 2000 has been particularly fruitful in the emergence of a variety of new systems showing strong light–matter coupling. Some remarkable examples include the strong coupling between a cavity and a quantum dot [7–9], organic materials [10], infrared cavities, and intersubband quantum well transitions [11], a confined electromagnetic mode and lattice vibrations [12], or the superconducting qubits and microwave resonators [13]. These impressive experimental advances have also triggered theorists to start investigating new physical effects emerging from the interplay between many-body effects due to interactions, and the intrinsically driven-dissipative nature of the polaritons [14].

The present dossier puts together a selected collection of articles reviewing recent progress in some of these areas.

Avant-propos – Couplage fort lumière–matière dans les systèmes à l'état solide : une perspective historique

La possibilité de réaliser une ingénierie des systèmes à l'état solide pour lesquels la lumière est fortement couplée aux excitations élémentaires de la matière a ouvert une nouvelle ère dans la manipulation des photons. En particulier, un régime, dit de couplage fort, apparaît lorsque l'échange d'énergie entre la matière et le champ de la lumière, généralement confiné dans une cavité, est plus rapide que les pertes. De nouveaux états propres du système, appelé polaritons, se forment alors, qui combinent les propriétés physiques de la matière et de la lumière. De par leur nature photonique, les polaritons peuvent être manipulés et détectés par des techniques optiques standard, tandis que leur composante matière leur confère des propriétés non linéaires spectaculaires.

Après de premiers travaux concernant des atomes couplés à des cavités micro-ondes [1,2], le champ de recherche sur les polaritons dans le domaine optique a réellement pris son essor en 1992, avec des travaux pionniers concernant deux systèmes physiques différents : le groupe de Jeff Kimble à Caltech [3] démontrait le régime de couplage fort pour un atome

<http://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2016.07.023>

1631-0705/© 2016 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

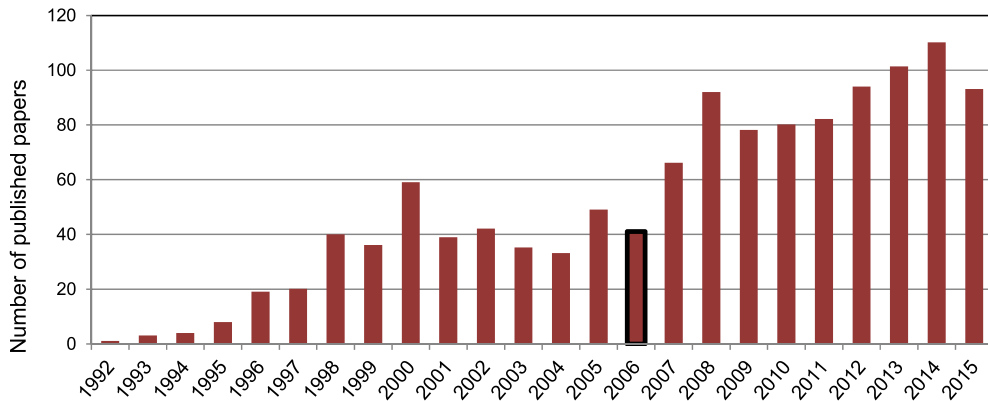


Fig. 1. Number of published papers per year whose title, abstract or keywords contain the words "polariton" and "microcavity". From Web of Science.

Fig. 1. Nombre d'articles publiés par an dont le titre, le résumé ou les mots clés contiennent les mots « polariton » ou « microcavité ». Données extraites de Web of Science.

unique dans une cavité optique, alors que, dans le même temps, Claude Weisbuch et ses collaborateurs à l'université de Tokyo [4] observaient le dédoublement spectral, caractéristique du couplage fort entre le mode optique Fabry-Pérot d'une microcavité à semiconducteurs (de type GaAs) et la résonance excitonique de puits quantiques insérés dans la cavité. La publication de ce dernier travail a suscité un vif intérêt dans la communauté des semiconducteurs, comme l'illustre la Fig. 1. Cette figure montre le nombre d'articles scientifiques publiés dans la littérature contenant les mots « microcavité » et « polariton » dans leur titre ou leur résumé.

L'une des prédictions les plus intéressantes dans le domaine des polaritons de microcavité concerne la condensation de Bose-Einstein : en raison de leur très faible masse effective, liée à leur caractère photonique, et également en raison de leur nature bosonique (en régime de faible densité), les polaritons de cavité devraient pouvoir former spontanément un condensat de Bose-Einstein à des températures très élevées en comparaison de celles de la physique atomique. Cette idée, proposée en 1996 par A. Imamoglu et ses collaborateurs [5], s'est vue réalisée expérimentalement en 2006 [6], inaugurant ainsi une longue série d'expériences sur les fluides quantiques de lumière en interaction dans les microcavités à semiconducteurs. Depuis 2006, de nombreux travaux expérimentaux se sont attaqués à des problèmes physiques fondamentaux, comme la superfluidité, la nucléation de tourbillons quantifiés (vortex) ou de solitons, la cohérence à longue portée spatiale, ou encore l'étude des fluides de polaritons dans des réseaux.

Les années 2000–2010 ont vu l'émergence d'un grand nombre de nouveaux systèmes physiques qui manifestent un couplage fort lumière-matière. Citons, parmi les exemples remarquables, le couplage entre une microcavité et une boîte quantique individuelle [7–9], les microcavités contenant des matériaux organiques [10], les cavités infrarouges couplées à des transitions inter sous-bandes de puits quantiques [11], des vibrations mécaniques d'un réseau cristallin couplé à un mode électromagnétique confiné [12], ou encore des qubits supraconducteurs couplés à des résonateurs micro-ondes [13]. Ces avancées expérimentales impressionnantes ont particulièrement motivé les théoriciens, qui ont commencé à explorer les nouveaux effets physiques qui émergent de la compétition entre les effets à N corps liés aux interactions et le caractère intrinsèquement dissipatif des polaritons [14].

Le présent volume des *Comptes rendus Physique* rassemble une sélection d'articles qui décrivent les progrès récents dans ce domaine de recherche très actif.

References

- [1] G. Rempe, H. Walther, N. Klein, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 353.
- [2] M. Brune, J.M. Raimond, P. Goy, L. Davidovich, S. Haroche, *Phys. Rev. Lett.* 59 (1987) 1899.
- [3] R.J. Thompson, G. Rempe, H.J. Kimble, *Phys. Rev. Lett.* 68 (1992) 1132.
- [4] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa, *Phys. Rev. Lett.* 69 (1992) 3314.
- [5] A. Imamoglu, R.J. Ram, S. Pau, Y. Yamamoto, *Phys. Rev. A* 53 (1996) 4250.
- [6] J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J.M.J. Keeling, F.M. Marchetti, M.H. Szymanska, R. André, J.L. Staehli, V. Savona, P.B. Littlewood, B. Deveaud, Le Si Dang, *Nature* 443 (2006) 409.
- [7] J.P. Reithmaier, G. Sek, A. Löffler, C. Hofmann, S. Kuhn, S. Reitzenstein, L.V. Keldysh, V.D. Kulakovskii, T.L. Reinecke, A. Forchel, *Nature* 432 (2004) 197.
- [8] T. Yoshie, A. Scherer, J. Hendrickson, G. Khitrova, H.M. Gibbs, G. Rupper, C. Ell, O.B. Shchekin, D.G. Deppe, *Nature* 432 (2004) 200.
- [9] E. Peter, P. Senellart, D. Martrou, A. Lemaître, J. Hours, J.M. Gerard, J. Bloch, *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 67401.
- [10] S. Kena-Cohen, S.R. Forrest, *Nat. Photonics* 4 (2010) 371.
- [11] D. Dini, R. Köhler, A. Tredicucci, G. Biasiol, L. Sorba, *Phys. Rev. Lett.* 90 (2003) 116401.
- [12] M. Aspelmeyer, T.J. Kippenberg, F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* 86 (2014) 1391.
- [13] A. Wallraff, D.I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.-S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S.M. Girvin, R.J. Schoelkopf, *Nature* 431 (2004) 162.
- [14] I. Carusotto, C. Ciuti, *Rev. Mod. Phys.* 85 (2013) 299.

Alberto Amo

*Centre de nanosciences et de nanotechnologies, CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, C2N – Marcoussis,
91460 Marcoussis, France*

Jacqueline Bloch

*Centre de nanosciences et de nanotechnologies, CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, C2N – Marcoussis,
91460 Marcoussis, France*

Physics Department, École Polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France

Iacopo Carusotto

INO-CNR BEC Center and Dipartimento di Fisica, Università di Trento, via Sommarive 14, 38123 Povo (Trento), Italy

Available online 11 August 2016