GEMaC
Groupe d'Étude de la Matière Condensée

INTERACTIONS CHARGES-VIBRATIONS-LUMIÈRE : VERS UNE MAÎTRISE DE LA THERMODYNAMIQUE HORS ÉQUILIBRE

Raouf Amara - laboratoire Kastler Brossel (CNRS, Sorbonne U, ENS)

Mardi 6 janvier 2026 à 14 h 00
Bâtiment Fermat, salle 4109

(English below)

Interactions charges-vibrations-lumière : vers une maîtrise de la thermodynamique hors équilibre

La relaxation énergétique après photoexcitation ne se réduit pas à une simple dissipation : l'énergie transite par une cascade complexe d'états où porteurs de charge, réseau cristallin et environnement interagissent hors équilibre. Pour maîtriser cette dynamique, il

est crucial de traiter les phonons non comme un bain thermique passif, mais comme un ensemble de sous-réservoirs hors équilibre mesurables et des leviers d'ingénierie.
Mon approche consiste à relier des observables optiques résolues en temps à des mécanismes microscopiques d'interactions charges-vibrations-lumière, afin de transformer cette cascade en outil de conception.

Dans un premier temps, je montrerai comment, à l'échelle de nanocristaux de pérovskite individuels, l'analyse spectro-temporelle met en évidence le rôle des phonons dans la structure fine et la photophysique [1], puis comment une microcavité reconfigurable permet de rendre le canal radiatif à la fois modulable et diagnosticable [2]. J'étendrai ensuite cette logique aux hétérostructures van der Waals, où l'ingénierie d'empilements permet de distinguer et programmer transfert d'énergie et transfert de charge [3]. Je présenterai également des développements méthodologiques récents en spectroscopie résolue en temps, dont une quantification robuste de la réflectivité transitoire, ainsi qu' une incursion vers des matériaux fonctionnels où la spectroscopie vibrationnelle vise à éclairer le transport ionique.

Dans un second temps, je présenterai mon projet visant à passer du diagnostic au contrôle des sous-réservoirs d'énergie hors-équilibre : cartographier ces sous-réservoirs transitoires et exploiter le lien entre bottleneck de phonons chauds et upconversion assistée par phonons.
L'objectif est d'établir et mettre en œuvre des règles de conception de l'environnement (nano-)photonique et des interfaces pour maîtriser la thermodynamique hors-équilibre dans des matériaux émergents.

Charge-Vibration-Light Interactions: Toward Mastering Nonequilibrium Thermodynamics

Energy relaxation after photoexcitation does not boil down to simple dissipation: energy flows through a complex cascade of states in which charge carriers, the crystal lattice, and the environment interact out of equilibrium. To master these dynamics, it is crucial to treat phonons not as a passive thermal bath, but as a set of measurables, out-of-equilibrium sub-reservoirs and as engineering levers. My approach is to connect time-resolved optical observables to microscopic mechanisms of charge–vibration–light interactions, to turn this cascade into a design tool.

First, I will show how, at the level of individual perovskite nanocrystals, spectro-temporal analysis reveals the role of phonons in fine structure and photophysics [1], and how a

reconfigurable microcavity makes the radiative channel both tuneable and diagnosable [2]. I will then extend this logic to van der Waals heterostructures, where stacking engineering makes it possible to distinguish and program energy transfer and charge transfer [3]. I will also present recent methodological developments in time-resolved spectroscopy, including a robust quantification of transient reflectivity, as well as an excursion toward functional materials where vibrational spectroscopy aims to shed light on ionic transport.

Second, I will present my project aimed at moving from diagnosis to control of out-of-equilibrium energy sub-reservoirs: mapping these transient sub-reservoirs and exploiting the link between the hot-phonon bottleneck and phonon-assisted upconversion. The goal is to establish and implement design rules for the (nano-)photonic environment and interfaces to master out-of-equilibrium thermodynamics in emerging materials.

[1] Amara et al., Nano Letters 23, 3607–3613 (2023) ; Amara et al., Nano Letters 24, 4265–4271 (2024).
[2] Said et al., arXiv.2503.20411 (2025).
[3] Liu et al., Nano Lett. 20, 5359–5366 (2020) ; Hu et al., ACS Nano 14, 13470–13477 (2020).