

Dynamique non-hermitienne et nonlinéaire des nanoparticules couplées par la lumière

Manuel Reisenbauer

Centre de Vienne pour les sciences et technologies quantiques
Faculté de Physique,
Université de Vienne
Vienne, Autriche
0000-0002-4617-524X

Klaus Hornberger

Faculté de Physique,
Université de Duisburg-Essen
Duisburg, Allemagne
0000-0002-3145-1117

Benjamin A. Stickler

Institut des systèmes quantiques complexes,
Université d'Ulm, Allemagne
0000-0001-9075-1008

Henning Rudolph

Faculté de Physique,
Université de Duisburg-Essen
Duisburg, Allemagne

Anton V. Zasedatelev

Département de physique appliquée,
Faculté des sciences de l'Université Aalto,
FI-00076 Espoo, Finlande
0000-0003-0414-5779

Uroš Delić

Centre de Vienne pour les sciences et technologies quantiques
Faculté de Physique,
Université de Vienne
Vienne, Autriche
0000-0002-1426-7289

Livia Egyed

Centre de Vienne pour les sciences et technologies quantiques
Faculté de Physique,
Université de Vienne
Vienne, Autriche
0009-0001-3246-2141

Murad Abuzarli

Centre de Vienne pour les sciences et technologies quantiques
Faculté de Physique,
Université de Vienne
Vienne, Autriche
0000-0003-2911-707X

Résumé— Nous observons une dynamique non-hermitienne provenant des interactions anti-réciproques médiées par la lumière diffusée entre deux nanoparticules piégées dans des pinces optiques séparées. L'émergence d'une dynamique collective de type prédateur-proie par-dessus des oscillations thermiques résulte en l'amplification du mouvement dû au mode propre sous-amorti. A partir d'un seuil de la force des interactions, la dynamique, qui, dans une description linéaire mènerait à une instabilité, montre une transition vers les cycles limites stables dans la trajectoire des deux particules. Cette stabilisation provient de la nonlinéarité des interactions et peut être interprétée comme un laser mécanique.

Ces résultats ouvrent la voie vers l'exploration des états hors-équilibre multicorps, assistée par le contrôle des sites individuels dans un réseau des particules piégées dans des pinces optiques.

Mots-clés — pince optique, nanoparticule, dynamique nonhermitienne, interaction nonréciproque, interaction nonlinéaire, cycle limite, laser mécanique

I. INTRODUCTION

Dans la dernière décennie l'optomécanique des objets lévités dans le vide s'est établie comme une plateforme prometteuse en vue de la réalisation des états quantiques de mouvement des objets macroscopiques. La facilité de piéger plusieurs particules simultanément permet de les faire interagir et explorer la dynamique collective. Récemment les interactions induites par la lumière diffusée et contrôlables en termes de leur réciprocité ont été observées entre deux nanoparticules piégées par des pinces optiques [1].

II. INTERACTIONS ANTI-RÉCIPROQUES

Dans ce travail nous exploitons cette nonréciprocité pour explorer la richesse de la dynamique collective de ces particules en présence du couplage anti-réciproque [2]. Ce couplage particulier est réalisé quand les forces entre les particules ont la même valeur et le même signe, c'est-à-dire lorsque la première particule attire la seconde, l'autre au contraire repousse la première et vice-versa. Expérimentalement, ce type de couplage est réalisé lorsque les deux conditions sont remplies :

1) La propagation entre les particules induit le déphasage de $\pm\pi/2$ sur les champs diffusés,

2) Les pièges sont déphasés de $\pm\pi/2$ l'un par rapport à l'autre.

Ainsi, en travaillant à des pressions du vide suffisamment élevé, autour de 0.5 mbar, nous réalisons un système de deux oscillateurs thermiquement agités et couplés par des interactions du type « prédateur-proie ».

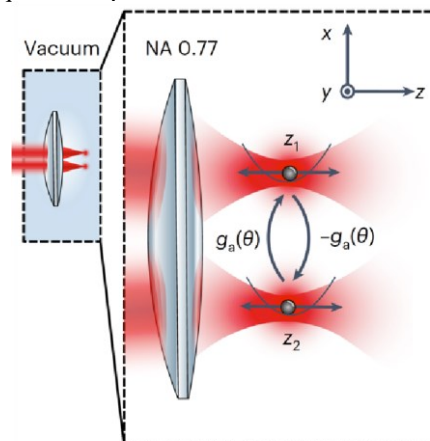


Figure 1 Visualisation schématique du montage expérimental. Deux faisceaux issus du même laser (longueur d'onde 1064 nm, puissance typique ≈ 300 mW par faisceau) sont focalisés avec une lentille de haute ouverture numérique (≈ 0.77) et forment ainsi les pinces optiques permettant de piéger des nanoparticules de silice (une par piège). Dans le piège une particule est soumise au potentiel harmonique et oscille autour du maximum d'intensité. La lumière des pinces diffusée entre nanoparticules induit leur interaction mécanique quantifiée par le taux g_1 . Cette interaction étant maximale le long de z , on étudie la dynamique selon cette direction. Adapté de [2].

III. RÉGIME LINÉAIRE

Nous étudions ce système expérimentalement d'abord en régime linéaire, caractérisé par des faibles amplitudes d'oscillation. Nous observons le verrouillage de la phase relative de mouvement ψ (Figure 2) entre les particules, accompagnée de l'amplification des amplitudes de leurs oscillations. Ce sont des signatures d'une dynamique collective non-hermitienne, étant les manifestations de deux états propres avec du gain et de la dissipation, respectivement. Ces modes propres brisent la symétrie du renversement du temps ce qui, en plus de la brisure de parité

venant des interactions non-réciproques, implique la brisure de symétrie Parité-Temps (PT). Le mode ayant du gain résulte en oscillations sous-amorties, donc d'amplitude plus élevée, alors que le mode dissipé est sur-amorti. Ainsi, le mode sous-amorti étant plus dominant dans le mouvement des deux particules, impose alors une phase relative stationnaire entre les deux particules. La valeur du gain et de la dissipation des modes sous- et sur-amorti dépend du désaccord en fréquence d'oscillation dans le piège $\Delta\Omega$ et de la force des interactions g_1 .

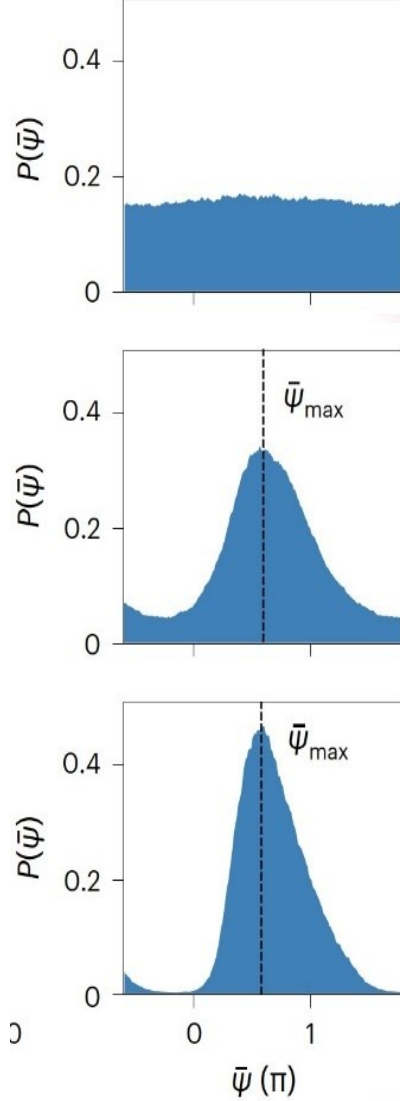


Figure 2 Verouillage de la phase relative. Histogrammes de la phase relative de mouvement $\psi\%$ pour les différentes forces des interactions augmentant de haut vers le bas. Adapté de [2].

De ce fait, la dynamique couplée est essentiellement dictée par deux paramètres : le désaccord $\Delta\Omega$ et le taux des interactions g_1 entre les particules. Le désaccord est contrôlé par l'intensité relative des faisceaux laser des pinces optiques, alors que la force des interactions est contrôlée par la direction de la polarisation de leur dipôles électriques induits.

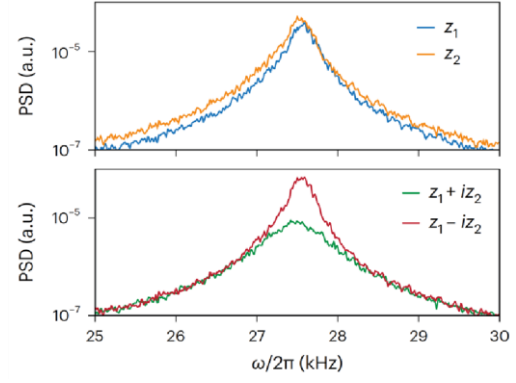


Figure 3 Reconstruction des modes propres du mouvement des nanoparticules dans le régime linéaire. [Haut] : Les Densités Spectrales de Bruit (DSB) de position selon l'axe z pour les deux particules. [Bas] : Les DSBs des modes propres sur-amorti (vert) et sous-amorti (rouge) reconstruits à partir des positions individuelles des particules. Adapté de [2].

IV. RÉGIME NONLINÉAIRE: CYCLES LIMITES

La dynamique des particules reste linéaire si la force des interactions reste inférieure au taux d'amortissement des oscillations (en l'absence des interactions). Au-delà de ce seuil, proche du désaccord nul, le gain du mode sous-amorti compense le taux d'amortissement et le modèle linéaire n'est plus valable car il prédit une amplitude d'oscillation qui croît exponentiellement avec le temps. C'est alors que les nonlinéarités du système rentrent en jeu et évitent que les particules s'échappent des pièges. Dans notre cas la nonlinéarité dominante est celle des interactions et consiste en une diminution de la force d'interaction avec l'amplitude d'oscillations croissante. De ce fait, à des faibles amplitudes les oscillations sont amplifiées, mais une fois l'amplitude est suffisamment large, le gain disparaît, en forçant les oscillations à se stabiliser à une amplitude intermédiaire. C'est ainsi qu'apparaît un cycle limite. Nous interprétons les cycles limites comme l'état de laser mécanique par l'analogie au phénomène de laser optique où la présence d'un gain saturable dans le milieu actif donne lieu à l'amplification de la lumière cohérente. L'aspect cohérent des oscillations mécaniques que nous observons consiste en la synchronisation des phases mécaniques des deux particules induites par les interactions anti-réciproques. Nous avons développé un modèle nonlinéaire qui permet de prédire l'amplitude des cycles limites en fonction du désaccord mécanique et de la force des interactions. Nous avons comparé les prédictions théoriques à des résultats de l'expérience et constatons l'accord raisonnable (Figure 4).

V. CONCLUSION

Nous avons réalisé un couplage anti-réciproque mécanique entre deux nanoparticules lévitées dans des pinces optiques. Ce couplage résulte en l'apparition d'une dynamique collective non-hermitienne ce qui est mis en évidence par l'identification des modes propres sous- et sur-amortis et la caractérisation de leurs conséquences sur la dynamique collective des particules par l'intermédiaire des histogrammes de la phase mécanique relative. En augmentant la force des interactions au-delà de la force d'amortissement, nous avons observé l'émergence des cycles limites, attestant le caractère nonlinéaire de la dynamique. Nous avons confronté les résultats expérimentaux à notre modèle incorporant la nonlinéarité de l'interaction et avons obtenu un accord

satisfaisant, confirmant ainsi notre compréhension des phénomènes mis en jeu. Ce travail met en évidence un outil puissant d'ingénierie des états mécaniques dissipatifs et nonlinéaires pour la réalisation des systèmes plus complexes, constitués de plusieurs particules interagissantes et hors

équilibre. L'exploration ultérieure de tels systèmes pourrait avoir des applications dans la métrologie et la réalisation des états quantiques collectifs de mouvement dans une chaîne de particules piégées.

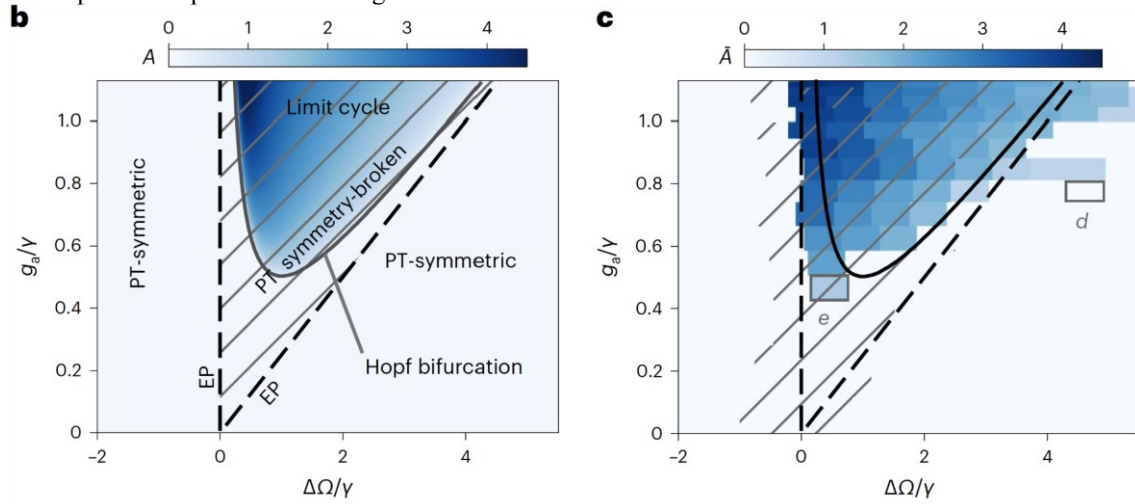


Figure 4 Amplitudes des cycles limites : comparaison entre la théorie incorporant les nonlinéarités (gauche) et les résultats expérimentaux (droite). Zones hachurées correspondent à des régions où la symétrie PT est brisée. Adapté de [2].

RÉFÉRENCES

- [1] J. Rieser et al. Tunable light-induced dipole–dipole interaction between optically levitated nanoparticles. *Science* 377, 987–990 (2022)
- [2] Reisenbauer, M., Rudolph, H., Egyed, L. et al. Non-Hermitian dynamics and non-reciprocity of optically coupled nanoparticles. *Nat. Phys.* 20, 1629–1635 (2024)