

Proyecto para tesis de Licenciatura : Efectos de correlación en la interacción de vórtices ópticos con trampas armónicas

May 26, 2021

Directora: Johanna Fuks, johannafuks@df.uba.ar
https://www.df.uba.ar/es/component/researchers/miembro/369-Johanna_Fuks
Lugar de trabajo: Departamento de Física, UBA

1 Antecedentes y propuesta de trabajo

Los vórtices ópticos (VOs), también llamados Twisted Light (TL), ofrecen una manera novedosa de interactuar con la materia y de observarla. Experimentalmente se han medido unas cuantos fenómenos que lo confirman [2, 3, 4]. Los VOs se diferencian de las ampliamente estudiadas ondas planas por su vorticidad, la capacidad de transportar momento angular orbital (OAM), una singularidad de fase y una rica y controlable distribución espacial de los campos eléctrico y magnético [5, 6, 7]. En la figura 1 se ilustran algunas de estas singularidades.

Podemos utilizar la estructura espacial del haz de TL como herramienta para estudiar efectos de correlación en la materia? Para intentar contestar esta pregunta estudiamos la interacción con una trampa armónica: un sistema de N partículas interactuantes atrapadas en un potencial parabólico. Las trampas armónicas se pueden fabricar en el laboratorio y controlar con mucha precisión y son por lo tanto buenas candidatas para ser usadas como simuladores cuánticos para estudiar fenómenos de muchos cuerpos.

2 Formación

Este proyecto tiene superposición con distintas áreas de la física que incluyen mecánica cuántica de muchos cuerpos, vórtices ópticos, interacción luz-materia, información cuántica, puntos cuánticos, trampas de iones, espectroscopía experimental y teórica y simulaciones ab initio. La propuesta tiene potenciales aplicaciones para nanotecnología y simuladores cuánticos.

La propuesta es que el estudiante se familiarice con las ecuaciones de la mecánica cuántica de muchos cuerpos, con la descripción matemática de los VOs, con la teoría del funcional

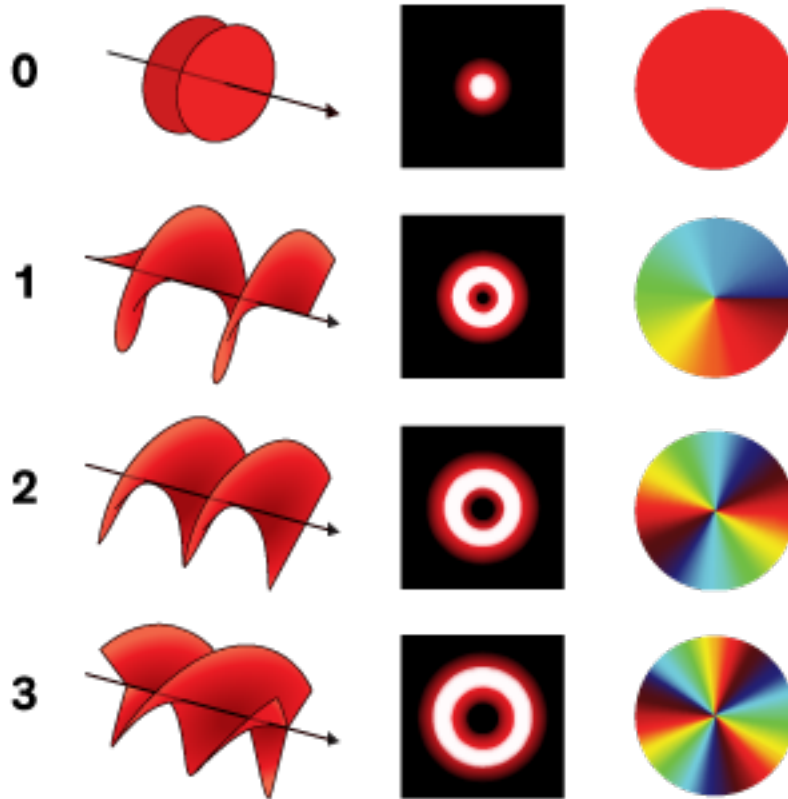


Figure 1: *Illustration: James Provost.* Primera columna desde la izquierda: carga topológica l , l más altos corresponden a mayor momento angular orbital (OAM); $l = 0$ corresponde a ondas planas. Segunda columna desde la izquierda: distribución espacial del campo de TL, cuanto mayor l mayor el tamaño del haz. Tercera columna desde la izquierda: OAM produce un efecto visible en la sección transversal: una forma de donut con un centro oscuro. Cuarta columna desde la izquierda: haces con valores altos de OAM tienen múltiples ciclos de cambio de fase, o sea que van de 0° a 360° múltiples veces al ir alrededor del centro del haz [1].

densidad dependiente del tiempo (TDDFT), la teoría de respuesta y el diseño de sistemas modelo y gane destreza en el uso del código open source octopus para simulaciones ab initio así como nociones básicas de python si no las tuviera ya.

3 Introducción

3.1 Trampas armónicas y Teorema Generalizado de Kohn

La ecuación de Schroedinger que describe una trampa armónica de N partículas tiene solución analítica en varios límites [9, 10]. En estos sistemas los grados de libertad del centro de masa y los internos son independientes.

El teorema generalizado de Kohn (GKT) [11, 12] nos dice q como consecuencia de esta separabilidad un laser prueba espacialmente homogéneo (ondas planas de longitud de onda larga) solo puede observar los grados de libertad del centro de masa.

Experimentalmente las trampas armónicas se pueden realizar en forma de puntos cuánticos, trampas de iones y trampas ópticas de átomos fríos y tb se pueden fabricar versiones uni-dimensionales de estos sistemas. Por su alta tunabilidad se han propuesto como simuladores cuánticos para estudiar fenómenos emergentes [8].

3.2 Estudios previos sobre interacción Twisted-Light–materia

En contraste con las ampliamente estudiadas ondas planas los VO tienen más estructura espacial y angular y su descripción matemáticamente es más compleja. A esta complejidad se le suma la de la materia. La descripción de la interacción de los haces estructurados con la materia es un área de investigación activa. No se han publicado simulaciones de la propagación de VOs en el vacío en un espacio discretizado (i.e. en una computadora) y mucho menos de la interacción con materia. Con pocas excepciones [13], los análisis teóricos se limitan al caso de interacción con una partícula única.

4 Propuesta

Podemos ajustar los parámetros del VO de tal manera que la interacción con la materia se pueda modelar con un campo escalar [14]. y para reducir aún mas el número de grados de libertad estudiamos el caso de la interacción con trampas armónicas.

En [15] propusimos utilizar la dependencia espacial de los VOs para medir la respuesta interna del sistema y exponer así efectos de la correlación entre partículas (efectos de muchos cuerpos) y demostramos que se pueden observar estos efectos en el espectro cuadrupolar. La figura 2 muestra la respuesta cuadrupolar de una trampa armónica uni-dimensional con dos electrones cuando la perturbamos con un haz de TL con $l = 0; 1; 2$ (de abajo hacia arriba) para distintos valores del confinamiento $\omega_0 = 0.5; 0.2; 0.1$ (unidades atómicas). A medida que ω_0 disminuye la interacción entre las partículas se vuelve dominante y esto se evidencia en el acercamiento de los picos del espectro para $l = 2$ que en el caso altamente correlacionado $\omega_0 = 0.1$ directamente se superponen.

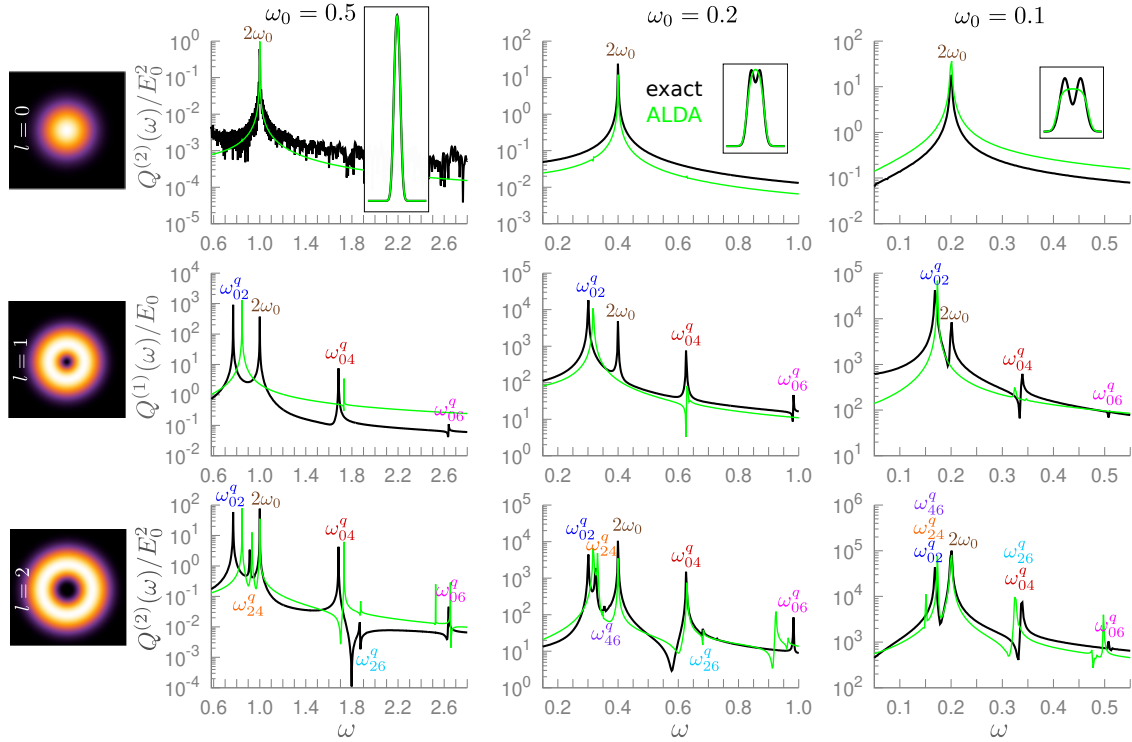


Figure 2: Espectro cuadrupolar exacto (negro) y aproximación de la densidad local adiabática (ALDA) (verde) de una trampa uni-dimensional de dos partículas con confinamientos $\omega_0 = 0.5; 0.2; 0.1$ (unidades atómicas) perturbada con una onda plana $l = 0$ (panel superior), un VO de $l = 1$ (panel del medio) y un VO de $l = 2$ (panel inferior). Las densidades del estado fundamental se muestran en un recuadro en el panel superior [15].

El objetivo de este proyecto de tesis es extender las simulaciones de la respuesta cuadrupolar para una trampa uni-dimensional con 3 partículas y si el tiempo lo permite también simular el caso de 2 partículas en una trampa bi-dimensional. El objetivo es confirmar a través de simulaciones de la solución exacta y simulaciones ab initio (en particular con el método TDDFT) que los efectos de correlación en la respuesta cuadrupolar se pueden observar en el caso de un número arbitrario de partículas y que asumen un comportamiento similar al observado para dos partículas en la Fig. 2. Para trampas armónicas bi-dimensionales también se podría estudiar en la respuesta cuadrupolar evidencias del intercambio de OAM.

Una prueba de TL como la que proponemos podría utilizarse para monitorear los efectos de correlación en un simulador cuántico tipo trampa armónica.

Un video poster sobre el proyecto: <https://www.youtube.com/watch?v=-m4UcFATkeM>

5 Factibilidad

Para la primera parte del proyecto (3 electrones en una trampa uni-dimensional) contamos con resultados preliminares. El código octopus en su versión estable cuenta con las utilidades necesarias para realizar estos cálculos y también los de la trampa bi-dimensional. En el grupo del Max Planck Institute de Hamburgo con el que colaboramos hay varios desarrolladores del código octopus a los que podemos consultar.

6 Grupo de trabajo

Este proyecto se enmarca en una colaboración con el grupo de Angel Rubio en el Max Planck Institute de Hamburgo.

7 Metodología

El proyecto de tesis es puramente teórico y tiene una parte analítica y otra computacional. Los cálculos numéricos se hará con el código open source octopus usando los recursos del cluster Dirac del departamento de Física y el Max Planck Computer Data & Facility MPCDF en Garching, Alemania.

References

- [1] AW Willner. Twisted light could dramatically boost data rates: Orbital angular momentum could take optical and radio communication to new heights. *IEEE Spectrum*, 2016.
- [2] Christian T. Schmiegelow, Jonas Schulz, Henning Kaufmann, Thomas Ruster, Ulrich G. Poschinger, and Ferdinand Schmidt-Kaler. Transfer of optical orbital angular momentum to a bound electron. *Nature Communications*, 7(12998), 2016.

- [3] Mehmet A. Noyan and James M. Kikkawa. Time-resolved orbital angular momentum spectroscopy. *Applied Physics Letters*, 107(3):032406, 2015.
- [4] Kyohhei Shigematsu, Yasunori Toda, Keisaku Yamane, and Ryuji Morita. Orbital angular momentum spectral dynamics of GaN excitons excited by optical vortices. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52(8S):08JL08, aug 2013.
- [5] Leslie Allen, Stephen M Barnett, and Miles J Padgett. *Optical angular momentum*. CRC press, 2003.
- [6] David L Andrews. *Structured light and its applications: An introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces*. Academic press, 2011.
- [7] G. F. Quinteiro, C. T. Schmiegelow, D. E. Reiter, and T. Kuhn. Reexamination of bessel beams: A generalized scheme to derive optical vortices. *Phys. Rev. A*, 99:023845, Feb 2019.
- [8] I. M. Georgescu, S. Ashhab, and Franco Nori. Quantum simulation. *Rev. Mod. Phys.*, 86:153–185, Mar 2014.
- [9] M. Taut. Two electrons in an external oscillator potential: Particular analytic solutions of a coulomb correlation problem. *Phys. Rev. A*, 48:3561–3566, Nov 1993.
- [10] M. Taut, K. Pernal, J. Cioslowski, and V. Staemmler. Three electrons in a harmonic oscillator potential: Pairs versus single particles. *The Journal of Chemical Physics*, 118(11):4861–4871, 2003.
- [11] L Brey, NF Johnson, and BI Halperin. Optical and magneto-optical absorption in parabolic quantum wells. *Physical Review B*, 40(15):10647, 1989.
- [12] S. K. Yip. Magneto-optical absorption by electrons in the presence of parabolic confinement potentials. *Phys. Rev. B*, 43:1707–1718, Jan 1991.
- [13] Mohamed Babiker, David L Andrews, and Vassilis E Lembessis. Atoms in complex twisted light. *Journal of Optics*, 21(1):013001, dec 2018.
- [14] G. F. Quinteiro, D. E. Reiter, and T. Kuhn. Formulation of the twisted-light–matter interaction at the phase singularity: The twisted-light gauge. *Phys. Rev. A*, 91:033808, Mar 2015.
- [15] Johanna I Fuks, Guillermo F Quinteiro, Heiko Appel, and Pablo I Tamborenea. Probing particle-particle correlation in harmonic traps with twisted light. *arXiv preprint arXiv:2105.05749*, 2021.