

Título em Português: Armadilha bidimensional arbitrária para gases atômicos degenerados

Título em Inglês: two-dimensional trap for degenerate quantum gases

Autor: Pedro Henrique Cook Cunha

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Patricia Christina Marques Castilho

Área de Pesquisa / SubÁrea: Física Atômica e Molecular

Agência Financiadora: FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

Armadilha bidimensional arbitrária para gases atômicos degenerados

Pedro H. C. Cook

Patrícia C. M. Castilho

Universidade de São Paulo, Instituto de física de São Carlos

pedrocook@usp.br

Objetivos

O objetivo deste projeto é a criação de sistemas de gases atômicos degenerados [1] em duas dimensões (2D), que pode ser feita através do uso de potenciais bidimensionais que são realizados em laboratório a partir do desenvolvimento de uma armadilha óptica arbitrária composta por duas partes: uma rede óptica do tipo *accordion*, a qual garante a obtenção de um gás em regime quasi-bidimensional a partir de um gás tridimensional (3D); e um potencial bidimensional arbitrário, resultante da modelagem de um feixe de laser, que atravessa um telescópio após sofrer reflexão em um *Digital Micromirror Device* (DMD). Esta armadilha será implementada a experimentos destinados à produção de condensados de Bose-Einstein (BECs) de duas espécies atômicas com interação variável: sódio e potássio. O projeto também busca estudar, por meio de simulações, o comportamento do estado fundamental de sistemas quânticos condensados aprisionados em potenciais bidimensionais, utilizando-se de uma aproximação de campo médio por meio da equação de Gross-Pitaevskii (GPE) e de um processo numérico de evolução temporal com o uso de tempo imaginário [2].

Materiais e métodos

Armadilhas ópticas se baseiam na força de dipolo proveniente da interação entre o momento de dipolo elétrico induzido nos átomos com o campo elétrico de um feixe de luz, de forma que o potencial tem a forma:

$$U_{ODT}(r) = \frac{3\pi c^2}{2\omega_0^3} \frac{\Gamma}{\Delta} I(r) \quad (1)$$

Sendo c a velocidade da luz no vácuo, ω_0 a frequência angular da transição atômica, Γ a taxa de decaimento da transição, $\Delta = \omega - \omega_0$ a dessintonia da luz com frequência angular ω em relação à transição atômica e $I(r)$ a intensidade do feixe de luz. A armadilha deste trabalho pretende utilizar o caso específico de um potencial repulsivo, *blue-detuned lasers* ($\Delta > 0$), no qual os átomos se acumulam nas regiões de mínimo de intensidade.

A criação de potenciais 2D arbitrários, por meio do DMD, deve levar em consideração dois fatores: a influência que uma resolução óptica finita tem sobre a passagem de um feixe de laser, com perfil de intensidade gaussiano, em um telescópio óptico; e a limitação binária dos espelhos de um DMD, que podem apenas refletir ou não luz (0 ou 1). Para lidar com isso, utiliza-se um método de difusão de erro integrado a um *feedback loop*.

Para a realização das simulações de sistemas quânticos 2D, considera-se que, a baixas temperaturas, devido à predominância da interação de contato de espalhamentos de onda-s, sistemas de gases de bósons fracamente interagentes podem ser descritos pela chamada equação de Gross-Pitaevskii:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r) + U_0|\psi(r)|^2\right)\psi(r) = \mu\psi(r) \quad (2)$$

Sendo $\hbar$ a constante de Dirac, m a massa de um bóson, $V(r)$ o potencial de aprisionamento externo, U_0 o termo de interação efetiva, o qual

depende do comprimento de espalhamento de onda- s a , $\psi(r)$ a função de onda do condensado e μ o potencial químico.

O procedimento numérico proposto para a obtenção do estado fundamental de um sistema quântico 2D qualquer, inclusive o de um BEC, funciona por meio da escolha de um estado inicial arbitrário que terá sua função de onda projetada na função de onda do estado fundamental através de uma propagação temporal de tempo imaginário [2].

Resultados

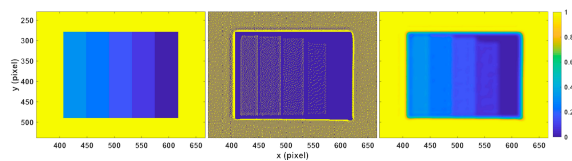


Figura 1: Esquema do processo de criação de Potenciais

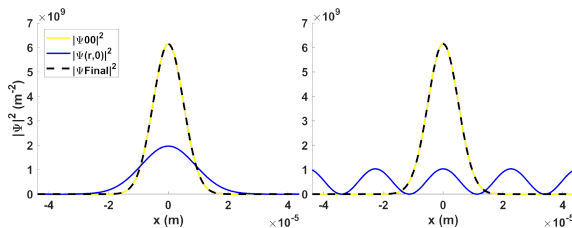


Figura 2: Estado fundamental de gases não interagentes aprisionados por um potencial harmônico

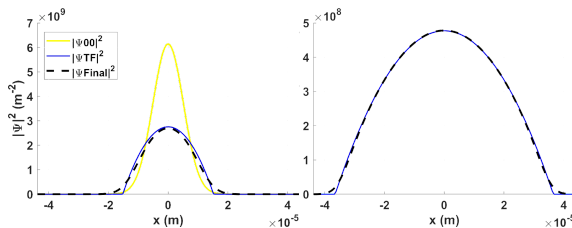


Figura 2: Estado fundamental de gases interagentes aprisionados por um potencial harmônico

Na Figura 1, a primeira imagem representa o potencial alvo, em seguida, o perfil dos espelhos no DMD (obtido por meio da difusão de erro) e, por fim, a imagem esperada para o potencial no plano atômico. As Figura 2 e 3 representam cortes horizontais do módulo ao quadrado das funções de onda bidimensionais. Na Figura 2, são apresentados duas diferentes escolhas de funções de onda iniciais, $\Psi(r, 0)$,

para o processo de obtenção do estado fundamental em gases sem interação. Já na Figura 3, dois sistemas com números diferentes de partículas (à esquerda $N = 300$ e à direita $N = 10000$) para gases com interação. Ψ_{00} representa a solução analítica do estado fundamental do oscilador harmônico quântico 2D, Ψ_{TF} representa a aproximação de Thomas-Fermi para a Equação 2 (válida para a condição de $N \gg 1$) e Ψ_{Final} representa as funções de onda ao atingirem o respectivo estado fundamental.

Conclusões

Estima-se que, com base nos resultados da criação de potenciais 2D, a semelhança entre um potencial alvo arbitrário e a imagem que será obtida experimentalmente no plano atômico, para o uso de um telescópio com resolução óptica de $1.0 \mu\text{m}$, deve ser de, aproximadamente, 80 à 90% (82% para o caso específico do potencial do tipo caixa). Com relação às simulações de gases atômicos 2D aprisionados, foi possível observar-se que, contanto que a função de onda inicial escolhida não seja ortogonal ao estado fundamental do potencial empregado, o sistema, interagente ou não, irá convergir para seu respectivo estado fundamental, validando o método numérico empregado.

As metas para o futuro são: Implementar, de fato, a armadilha óptica em laboratório, fato este que foi impossibilitado em vista das restrições provenientes da pandemia de COVID-19; Ampliar o algoritmo utilizado para as simulações de sistemas condensados com o intuito de simular agora sistemas de misturas de dois condensados, estudando assim suas propriedades.

Referências

- [1] VILLE, J. et al. Loading and compression of a single two-dimensional bose gas in an optical accordion. *Physical Review A*, v. 95, n. 1, p. 013632-1-013632-7, 2017. DOI 10.1103/PhysRevA.95.013632.
- [2] CASTILHO, P. C. M. New experimental system to study coupled vortices in a two-species BoseEinstein condensate $^{23}\text{Na} - ^{41}\text{K}$ with tunable interactions. 2017. 213 p. Thesis (Doctor of Science) - IFSC-USP, 2017.

Two-dimensional trap for degenerate quantum gases

Pedro H. C. Cook

Patrícia C. M. Castilho

University of São Paulo, Instituto de física de São Carlos

pedrocook@usp.br

Objectives

The goal of this project is the creation of degenerate quantum gases systems in two-dimensions (2D), which can be done through the use of two-dimensional potentials that are realized in the laboratory from the development of an arbitrary optical trap composed of two parts: an accordion-type optical lattice, which guarantees the obtainment of a gas in quasi-two-dimensional regime from a three-dimensional (3D) gas; and an arbitrary two-dimensional potential, resulting from the modeling of a laser beam, which passes through a telescope after undergoing reflection in a Digital Micromirror Device (DMD). This trap will be implemented in experiments aimed at producing Bose-Einstein condensates (BECs) of two atomic species with variable interaction: sodium and potassium. The project also seeks to study, through simulations, the behavior of the ground state of quantum condensed systems trapped in two-dimensional potentials, using a mean field approximation by means of the Gross-Pitaevskii equation (GPE) and a numerical process of temporal evolution using imaginary time [2].

Materials and Methods

Optical traps are based on the dipole force arising from the interaction between the electric induced dipole moment in atoms with the electric field of a light beam, so that the potential has the form:

$$U_{ODT}(r) = \frac{3\pi c^2}{2\omega_0^3} \frac{\Gamma}{\Delta} I(r) \quad (1)$$

Where c is the speed of light in vacuum, ω_0 is the angular frequency of the atomic transition, Γ the decay rate of the transition, $\Delta = \omega - \omega_0$ the desynchrony of light with angular frequency ω with respect to the atomic transition and $I(r)$ is the intensity of the light beam. The trap of this work intends to use the specific case of a repulsive potential, blue-detuned lasers ($\Delta > 0$), in which atoms accumulate in the regions of minimum intensity.

The creation of arbitrary 2D potentials using the DMD must take two factors into account: the influence that a finite optical resolution has on the passage of a laser beam, with Gaussian intensity profile, in an optical telescope; and the binary limitation of the mirrors of a DMD, which can only reflect or not reflect light (0 or 1). To deal with this, an error diffusion method integrated with a feedback loop is used.

To perform the simulations of 2D quantum systems, it is considered that at low temperatures, due to the predominance of the contact interaction of s-wave scattering, weakly interacting systems of boson gases can be described by the so-called Gross-Pitaevskii equation:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r) + U_0|\psi(r)|^2\right)\psi(r) = \mu\psi(r) \quad (2)$$

Where $\hbar$ is the Dirac constant, m is the mass of a boson, $V(r)$ is the external trapping potential, U_0 is the effective interaction term, which depends on the s-wave scattering length a , $\psi(r)$ is the condensate wave function and μ is the chemical potential.

The proposed numerical procedure for obtaining the fundamental state of any 2D quantum system, including that of a BEC, works by choosing an arbitrary initial state that will have its wave function projected onto the wave function of the fundamental state through a time propagation of imaginary time [2].

Results

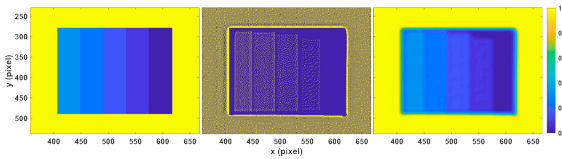


Figure 1: Schematic of the Potentials Creation Process

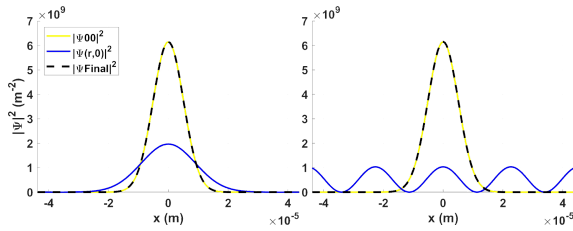


Figure 2: Ground state of non-interacting gases trapped by a harmonic potential

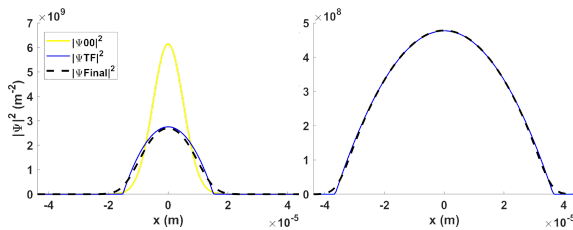


Figure 3: Ground state of interacting gases trapped by a harmonic potential

In Figure 1, the first image represents the desired target potential, then the profile of the mirrors in the DMD (obtained through error diffusion), and finally the expected image of the potential in the atomic plane. Figure 2 and 3 represent horizontal slices of the squared modulus of the two-dimensional wave functions. Figure 2 shows two different choices of initial wave functions, for the process of obtaining the fundamental state in non-interacting gases. Figure 3 shows two systems with different numbers of particles (left $N = 300$ and right $N = 10000$) for interacting gases. Ψ_{00} represents the analytical solution

for the fundamental state of the 2D quantum harmonic oscillator, Ψ_{TF} represents the Thomas-Fermi approximation for Equation 2 (valid for the condition $N \gg 1$) and Ψ_{Final} represents the wave functions upon reaching the respective ground state.

Conclusion

It is estimated that, based on the results of the creation of 2D potentials, that the similarity between an arbitrary target potential and the image that will be experimentally obtained in the atomic plane, using a telescope with optical resolution of $1.0 \mu\text{m}$, should be approximately 80 to 90% (82% for the specific case of the box potential). Regarding the simulations of trapped 2D atomic gases, it was possible to observe that, as long as the initial wave function chosen is not orthogonal to the ground state of the potential employed, the system, interacting or not, will converge to its respective ground state, validating the numerical method employed.

The goals for the future are: to actually implement the optical trap in the laboratory, a fact that was made impossible in view of the restrictions coming from the COVID-19 pandemic; to extend the algorithm used for the simulations of condensed systems in order to simulate now systems of mixtures of two condensates, thus studying their properties.

References

- [1] VILLE, J. et al. Loading and compression of a single two-dimensional bose gas in an optical accordion. *Physical Review A*, v. 95, n. 1, p. 013632-1-013632-7, 2017. DOI 10.1103/PhysRevA.95.013632.
- [2] CASTILHO, P. C. M. New experimental system to study coupled vortices in a two-species BoseEinstein condensate ^{23}Na - ^{41}K with tunable interactions. 2017. 213 p. Thesis (Doctor of Science) - IFSC-USP, 2017.