

**Título em Português:** Experimentos com superfluidos quânticos excitados e determinação de propriedades através das correlações e simetrias

**Título em Inglês:** experiments with excited quantum superfluids and determination of properties through correlations and symmetries

**Autor:** João Pedro Gasparini Venassi

**Instituição:** Universidade de São Paulo

**Unidade:** Instituto de Física de São Carlos

**Orientador:** Vanderlei Salvador Bagnato

**Área de Pesquisa / SubÁrea:** Física Atômica e Molecular

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

## **Experimentos com superfluidos quânticos excitados e determinação de propriedades através das correlações e simetrias**

**João Pedro Gasparini Venassi**

**Gustavo Deczka Telles**

**Vanderlei Salvador Bagnato**

Universidade de São Paulo

[jpvenassi@usp.com](mailto:jpvenassi@usp.com)

### **Objetivos**

Um condensado de Bose-Einstein (BEC, em inglês) produzido em laboratório é um estado da matéria caracterizado por um fluido gasoso monoatômico de temperatura muito baixa [1]. O estudo desses sistemas físicos e dos fenômenos a ele associados desperta muito interesse pelas diversas possíveis aplicações. Em nosso laboratório, o foco da pesquisa tem sido o estudo de condensados perturbados [2]. Nesse estado, os condensados apresentam comportamentos diferentes por estarem fora de equilíbrio térmico.

O objetivo do nosso trabalho é aplicar técnicas de processamento de imagem para investigar em maior detalhe o comportamento distinto de BECs perturbados, produzidos por átomos de  $^{87}\text{Rb}$ . O foco de nosso trabalho é o estudo da quebra de simetria espacial e a evolução e eventuais mudanças de forma, simetria, correlação densidade-densidade da nuvem atômica em diferentes condições de não equilíbrio. Busca-se então caracterizar melhor a evolução temporal de BECs fora do equilíbrio através da análise da distribuição espacial das amostras de modo desvinculado de qualquer modelo físico.

### **Métodos e Procedimentos**

Para se produzir um BEC é necessário resfriar e comprimir espacialmente uma coleção de átomos capturados até temperaturas da ordem de nK, com densidades de pico de aproximadamente  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Inicialmente os átomos são presos em uma armadilha magneto-óptica 3D, onde é possível atingir limites sub-doppler de temperatura, e então uma armadilha puramente magnética, onde é realizado o processo de resfriamento evaporativo forçado.

Imagens da sombra das nuvens atômicas são obtidas através do método conhecido como imagem por absorção. Utilizando um feixe de prova ressonante para iluminar os átomos e uma câmera CCD, três imagens diferentes (uma da sombra do condensado, uma do feixe e um do fundo) são combinadas para obter a imagem final, juntamente com uma normalização necessária devido a possíveis alterações na imagem causadas pela alta intensidade do feixe [3].

As imagens são pós-processadas para extrair as informações de interesse, com o auxílio de imagens binárias [4], em coordenadas cartesianas e/ou polares que evidenciam as simetrias espaciais da expansão

atômica durante o tempo-de-vôo (TOF, em inglês) em queda livre.

## Resultados

O processamento das imagens nos permite determinar com segurança: a excentricidade do condensado, o perímetro e a razão dos comprimentos dos semi-eixos, entre outras grandezas dissociadas de qualquer modelo teórico pré existente. Além dessas características físicas básicas, também foram determinados os valores de outras grandezas, mais comuns em uma visão computacional, tais como o erro quadrático médio (em inglês, *mean squared error*: MSE) e também o índice de semelhança estrutural (em inglês, *Structural similarity index*: SSI) que quantifica a diferença existente entre pixels de duas imagens, incluindo o valor da intensidade.

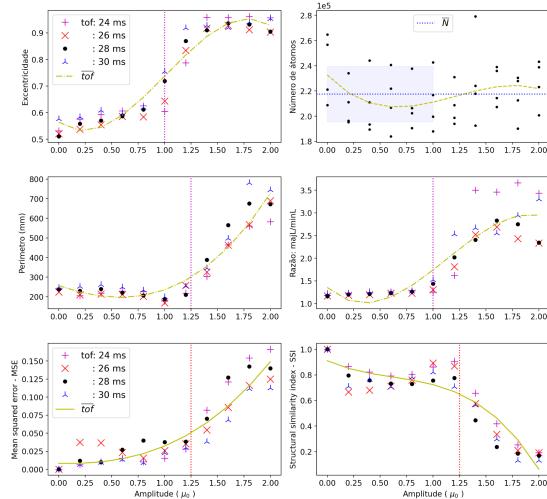


Figura 1: Resultados principais

Também estudamos imagens obtidas pela transformação de coordenadas do condensado, com as imagens subtraídas em relação um eixo de simetria (horizontal e vertical), e com o uso de uma elipse determinada pela excentricidade de cada nuvem, permitindo uma investigação da simetria espacial característica existente.

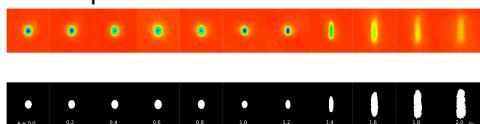


Figura 2: Imagem dos condensados e sua versão binária para um TOF=24ms

## Conclusões

Um dos principais desafios no estudo dos condensados de Bose-Einstein fora do equilíbrio é a correta determinação de sua forma e tamanho. Neste trabalho, procuramos explorar os desafios e oportunidades apresentados pelo uso de técnicas de processamento de imagens para a determinação automatizada e confiável do tamanho e formato de condensados de Bose-Einstein fora do equilíbrio. Concluindo, a determinação automatizada do formato e tamanho de condensados bosônicos pela aplicação de métodos já estabelecidos de visão computacional deve permitir aos pesquisadores obter uma compreensão mais profunda e rápida dos fenômenos associados aos BECs e suas propriedades fundamentais. Além disso, pode levar a novos insights sobre os principais fundamentos físicos envolvidos e, eventualmente, ao desenvolvimento de novas tecnologias.

## Referências

- [1] F. Dalfovo, S. Giorgini, L. P. Pitaevskii, and S. Stringari, Theory of Bose-Einstein Condensation in Trapped Gases, *Reviews of Modern Physics* **71**, 463 (1999).
- [2] V. Bagnato et al., Characteristics and Perspectives of Quantum Turbulence in Atomic Bose-Einstein Condensates, *Springer Series in Solid-State Sciences* **177**, 301 (2013)..
- [3] G. Reinaudi, T. Lahaye, Z. Wang, and D. Guéry-Odelin, Strong Saturation Absorption Imaging of Dense Clouds of Ultracold Atoms, *Optics Letters* **32**, 3143 (2007).
- [4] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. (Pearson, New York, Ny, 2018).

## **Experiments with excited quantum superfluids and determination of properties through correlations and symmetries**

**João Pedro Gasparini Venassi**

**Gustavo Deczka Telles**

**Vanderlei Salvador Bagnato**

University of São Paulo

[jpvenassi@usp.com](mailto:jpvenassi@usp.com)

### **Objectives**

A laboratory-produced Bose-Einstein condensate (BEC) is a state of matter characterized by a monatomic gaseous fluid of very low temperature [1]. The study of these physical systems and the phenomena associated with them arouses much interest due to the various possible applications. In our laboratory, the focus of research has been the study of disturbed condensates [2]. In this state, the condensates exhibit different behaviors as they are out of thermal equilibrium.

The aim of our work is to apply image processing techniques to investigate in greater detail the distinct behavior of perturbed BECs produced by  $^{87}\text{Rb}$  atoms. The focus of our work is the study of the breaking of spatial symmetry and the evolution and eventual changes in shape, symmetry, density-density correlation of the atomic cloud in different non-equilibrium conditions. The aim is then to better characterize the temporal evolution of non-equilibrium BECs through the analysis of the spatial distribution of the samples in a way that is detached to any physical model.

### **Materials and Methods**

To produce a BEC it is necessary to cool and spatially compress a collection of captured atoms to temperatures on the order of nK, with peak densities of approximately  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Initially the atoms are trapped in a 3D magneto-optical trap, where it is possible to reach sub-Doppler temperature limits, and then a purely magnetic trap, where the forced evaporative cooling process is carried out.

Images of the shadow of atomic clouds are obtained using a method known as absorption imaging. Using a resonant probe beam to illuminate the atoms and a CCD camera, three different images (one of the condensate shadow, one of the beam and one of the background) are combined to obtain the final image, along with a normalization required due to possible changes in the image caused by the high beam intensity [3].

The images are post-processed to extract the information of interest, with the aid of binary images [4], in Cartesian and/or polar coordinates that highlight the spatial symmetries of atomic expansion during time-of-flight (TOF) in free fall.

### **Results**

Image processing allows us to safely determine: the eccentricity of the condensate,

the perimeter and the ratio of the lengths of the semi-axes, among other quantities dissociated from any pre-existing theoretical model. In addition to these basic physical characteristics, the values of other quantities, more common in computer vision, were also determined, such as the mean squared error (MSE) and also the structural similarity index (Structural similarity index: SSI) which quantifies the difference between pixels of two images, including the intensity value.

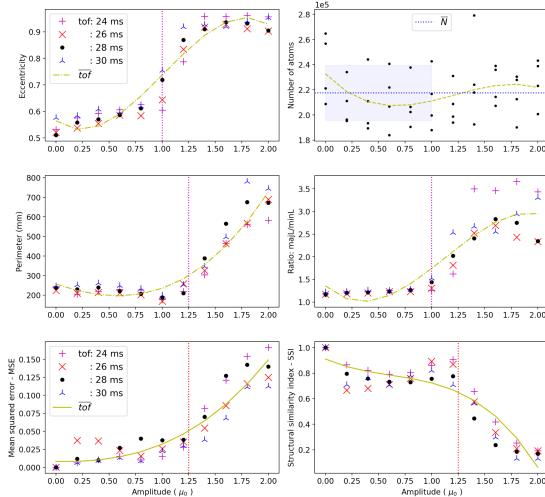


Figure 1: Main results

We also studied images obtained by transforming the condensate coordinates, with the images subtracted in relation to an axis of symmetry (horizontal and vertical), and using an ellipse determined by the eccentricity of each cloud, allowing an investigation of the existing characteristic spatial symmetry.

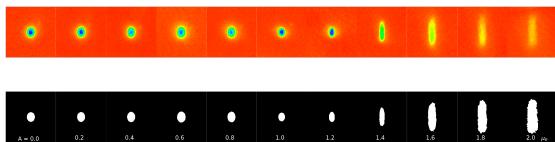


Figure 2: Image of condensates and their binary version for TOF=24ms

## Conclusions

One of the main challenges in studying non-equilibrium Bose-Einstein condensates is

the correct determination of their shape and size. In this work, we seek to explore the challenges and opportunities presented by the use of image processing techniques for the automated and reliable determination of the size and shape of non-equilibrium Bose-Einstein condensates. In conclusion, automated determination of the shape and size of bosonic condensates by applying already established computer vision methods should allow researchers to gain a deeper and faster understanding of the phenomena associated with BECs and their fundamental properties. Furthermore, it can lead to new insights into the main physical foundations involved and, eventually, the development of new technologies.

## References

- [1] F. Dalfovo, S. Giorgini, L. P. Pitaevskii, and S. Stringari, Theory of Bose-Einstein Condensation in Trapped Gases, *Reviews of Modern Physics* **71**, 463 (1999).
- [2] V. Bagnato et al., Characteristics and Perspectives of Quantum Turbulence in Atomic Bose-Einstein Condensates, *Springer Series in Solid-State Sciences* **177**, 301 (2013)..
- [3] G. Reinaudi, T. Lahaye, Z. Wang, and D. Guéry-Odelin, *Strong Saturation Absorption Imaging of Dense Clouds of Ultracold Atoms*, *Optics Letters* **32**, 3143 (2007).
- [4] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. (Pearson, New York, Ny, 2018).