

Turbulência Quântica

Anderson Roberto de Oliveira
Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil

Resumo

Neste trabalho apresentamos uma breve introdução à turbulência quântica. Justificamos a quantização dos vórtices em superfluidos e apresentamos ainda os resultados experimentais da evolução de BECs do regime não turbulento (mas com vórtices) para o regime turbulento (com vórtices emaranhados). Apresentamos ainda os resultados de trabalhos voltados para a obtenção do limite entre os regimes não turbulento e turbulento. Este estudo visa a uma compreensão simples do fenômeno, uma vez que o processo mostra-se bastante complexo e ainda há muito desenvolvimento teórico e experimental a ser feito na área.

1. Introdução

Fluidos submetidos a temperaturas muito baixas, próximas ao zero absoluto, adquirem propriedades especiais, tais como a superfluidez. Essa propriedade é caracterizada pela ausência de viscosidade do material ao fluir. Assim como em mecânica de fluidos clássicos, o movimento não laminar/estacionário do superfluido pode produzir vórtices e, conseqüentemente, evoluir para a turbulência quântica (QT). Esta pode ser basicamente definida como a dinâmica mais geral de emaranhados de linhas finas de vórtices quantizados com certas propriedades especiais [1]. Uma das principais motivações para o estudo da QT é o entendimento da sua relação com a turbulência clássica.

Historicamente, a QT foi sugerida teoricamente por Feynman (1955) [2]. Ela deveria ocorrer em ^4He ultra frio como um emaranhado aleatório de vórtices quantizados. De fato, boa parte do conhecimento sobre QT provém do estudo utilizando He II (^4He em seu estado superfluido). Os primeiros experimentos foram realizados por Vinen (1957) [3] em experimentos de contrapropagação termicamente

induzida na qual fluido normal e superfluido se movem em direções opostas. Esse método de fluidos contrapropagantes não possui equivalente clássico. Outras formas de produção de QT em He II também foram estudadas tais como o movimento contínuo ou oscilante de uma grade dentro do material.

Mais recentemente, estudos mostraram ser possível a geração de turbulência quântica em condensados de Bose-Einstein (BEC) de gases em armadilhas [4-5]. Os vórtices podem ser produzidos introduzindo-se uma rotação na nuvem. Desta forma, eles se arranjam em uma estrutura cristalina com mesma direção e orientação de rotação. Isso em si não constitui a QT. Vários métodos foram propostos para se obter a QT, tais como a combinação de rotações em dois eixos ortogonais, tipos especiais de excitações oscilatórias impostas ao BEC, entre outros. A vantagem de se produzir turbulência quântica em BECs é o maior controle devido ao tamanho finito da amostra imposta pela armadilha.

Neste trabalho apresentamos um resumo sobre turbulência quântica. Apresentamos ainda

resultados de trabalhos recentes da realização de QT em condensados de Bose-Einstein.

A divisão do artigo é feita da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma introdução teórica aos superfluidos justificando a quantização dos vórtices que surgem; a seção 3 mostra resultados na evolução de BECs para turbulência quântica bem como a presença de um limiar entre os regimes turbulento e não turbulento. Por fim, nas seções 4 e 5 são apresentadas as conclusões e referências, respectivamente

2. Quantização dos vórtices

A razão física para a superfluidez é a característica bosônica dos átomos do BEC que são submetidos à condensação de Bose Einstein no espaço de momento em 3d e pode ser entendida como uma manifestação da mecânica quântica em escala macroscópica. A amostra de superfluido deve ser descrita por uma função de onda simples e macroscópica, da forma $\Psi \propto e^{i\phi}$, onde ϕ é a fase macroscópica. Aplicando-se o operador impulso, $-i\hbar\nabla$, na função de onda macroscópica e expressando o impulso por átomo de massa m como $\vec{p} = m\vec{v}_s$, é fácil notar que a velocidade macroscópica está relacionada ao gradiente da fase, $\vec{v}_s \propto \nabla\phi$. Segue diretamente que o campo de velocidades do superfluido deve ser irrotacional, $\nabla \times \vec{v}_s \propto \nabla \times \nabla\phi = \vec{0}$. Se o fluido for incompressível, ou seja, $\nabla \cdot \vec{v}_s = 0$, é possível notar a similaridade entre a superfluidez e o eletromagnetismo. As equações de Maxwell no vácuo para o campo indução magnética são exatamente da mesma forma: $\nabla \times \vec{B} = \vec{0}$, $\nabla \cdot \vec{B} = 0$. Esta analogia é frequentemente utilizada para o cálculo do campo de velocidades utilizando-se a lei de Biot-Savart na presença de vórtices quantizados.

O superfluido pode fluir sem dissipação se estiver sujeito a certos vínculos quânticos. Essas restrições são que a única forma de movimento rotacional permitida no superfluido é um vórtice em uma linha fina, cuja circulação em torno do seu núcleo não é arbitrária como em fluidos clássicos, mas quantizada. A maneira mais conveniente de introduzir a quantização dos vórtices segue da definição da função de onda macroscópica no superfluido. A partir da forma funcional $\Psi = \sqrt{\rho_s}e^{i\phi}$, segue que Ψ permanece constante se a fase macroscópica muda de $\pm 2n\pi$, com n sendo um inteiro. A circulação é definida como uma integral ao longo de um caminho fechado L dentro do superfluido:

$$\Gamma = \oint_L \vec{v}_s \cdot d\vec{l} = \frac{\hbar}{m} \oint_L \nabla\phi \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

Esta integral não depende do caminho, uma vez que permanece constante dentro do superfluido. Por argumentos de constância da função de onda no caminho L , é possível mostrar que a circulação deve ser quantizada como:

$$\Gamma = n \frac{\hbar}{m} = n\kappa \quad (2)$$

Nesta equação, κ é o *quantum* de circulação. O tamanho dos núcleos quantizados é da ordem do chamado *healing length*, que representa uma distância característica na qual a amplitude da função de onda macroscópica muda.

3. Turbulência quântica em BEC

Suponhamos um BEC em armadilha harmônica cujas frequências são uma ν_r e ν_z . Uma possibilidade para se criar vórtices em um condensado de Bose-Einstein consiste em adicionar um campo magnético externo oscilante

através de um par de espiras na configuração anti-Helmholtz com seu eixo próximo, mas não perfeitamente paralelos ao eixo mais fraco da armadilha. Com isso, o gradiente de campo externo terá componentes paralelas a cada um dos eixos do condensado. Se a amplitude da oscilação e o tempo de exposição da amostra à perturbação forem grandes o suficiente, podem-se produzir vórtices e anti vórtices não paralelos. Caso o número de vórtices produzidos seja suficientemente grande, as limitações do tamanho do condensado, entre outros fatores, podem fazer com que o sistema evolua para a turbulência quântica.

Em um trabalho recente, Bagnato *et al.* [4] mostraram a transição à turbulência quântica em um sistema composto de átomos de ^{87}Rb formando um condensado. Em seus experimentos, $v_r/v_z = 9$, o que corresponde a uma armadilha em forma de charuto. Além disso, a excitação externa utilizada foi de 200 Hz, sendo que a amplitude e o tempo de aplicação do campo externo foram variados. Os resultados foram observados depois de um tempo de voo de 20 ms. As frequências da armadilha harmônica foram de $\nu_r = 207$ Hz e $\nu_z = 23$ Hz. O BEC em forma de charuto continha em torno de 2×10^5 átomos com uma fração condensada entre 40 e 70%. Conforme a amplitude/tempo de exposição aumentaram, os vórtices começaram a ser gerados. Eles podem ser observados como grandes regiões escuras na imagem de absorção depois do tempo de voo. As amplitudes foram variadas de 0 a 200 mG/cm e o tempo de excitação até 60 ms. A Fig. 1 mostra duas situações: a presença de vórtices num regime não turbulento e o regime turbulento, com vórtices emaranhados.

Através dessas medidas, foi possível a obtenção de uma curva que dá o limiar de

turbulência nesse experimento, como mostra a Fig. 2.

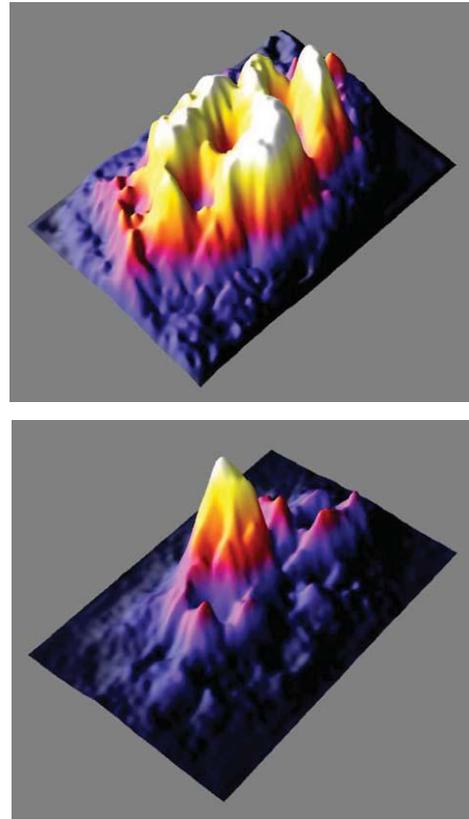


Fig. 1 – Regime não turbulento, com vórtices separados e bem definidos (figura superior) e turbulento onde a absorção parcial muda ao longo da imagem devido à existência de um emaranhado de vórtices (figura inferior) em BEC de ^{87}Rb com armadilha harmônica e excitação externa oscilante.

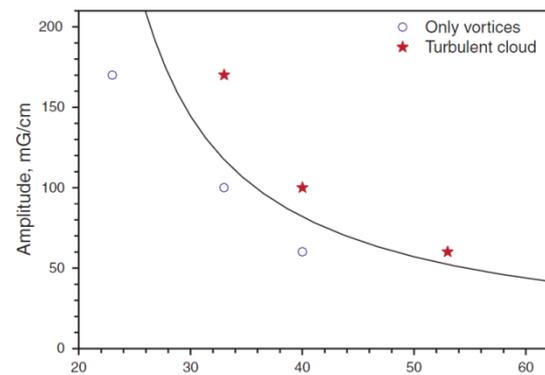


Fig. 2 – Diagrama no plano amplitude-tempo de excitação demonstrando a transição entre os regimes turbulento e não turbulento da nuvem atômica.

Em outro trabalho, Bagnato *et al.* [5] mostraram a evolução de um sistema para o regime turbulento. Utilizando os mesmos parâmetros experimentais, com a excitação externa com um offset que mantinha a amplitude

mínima em 0 e a máxima até 190 mG/cm levemente inclinado em relação ao eixo vertical, observaram a evolução do sistema por meio de medidas de tempo de voo. Observou-se que vórtices são gerados na região entre o condensado e a nuvem térmica. Inicialmente eles penetram em uma pequena região dentro do superfluido, da ordem do tamanho do vórtice. Conforme a nuvem acumula energia, os vórtices penetram completamente na porção condensada. A Fig. 3 mostra o início do processo com o primeiro vórtice dentro da parte condensada.



Fig. 3 – Imagem ampliada de uma típica imagem de absorção contendo vórtices gerados na interface entre as frações condensada e térmica da nuvem.

É possível notar claramente na figura os vórtices nos arredores da parte condensada da nuvem. Nesse experimento, a formação de vórtices não é restrita a uma direção preferencial. Com isso, após a geração de vórtices, a distribuição evolui para a turbulência. A evolução de uma nuvem condensada superfluida regular para uma nuvem turbulenta é mostrada na Fig. 4.

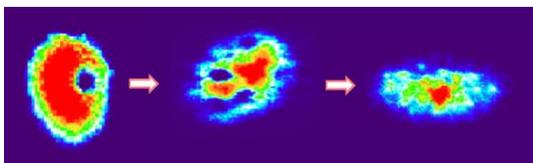


Fig. 4 – Perfis atômicos bidimensionais mostrando a evolução de um condensado regular (com um único vórtice) para um fluido turbulento (nuvem emaranhada).

A nuvem turbulenta é caracterizada por uma distribuição de vórtices em direções diferentes. A partir desse regime de turbulência vários estudos podem ser feitos, como a investigação da

analogia da turbulência em um condensado armadilhado e do fluir de um superfluido através de uma geometria cujas dimensões são semelhantes a um BEC típico.

4. Conclusões

O estudo da turbulência em sistemas diferentes de hélio líquido é bastante atrativo e abre novas possibilidades de estudo e pesquisa. Superfluidos armadilhados são sistemas de tamanho e número finito e, por isso, novos efeitos, ausentes em sistemas homogêneos, devem aparecer. Os efeitos do tamanho finito do sistema devem colocar um limite no número máximo de vórtices permitidos na nuvem superfluida antes desta evoluir para a turbulência. Isso pode ter fortes implicações no comportamento dinâmico dos estados turbulentos. Por isso, novos estudos, tanto experimentais quanto teóricos são necessários para melhor entendimento desse fenômeno.

5. Referências

- [1] Skrbek, L.; “Quantum turbulence”. *Journal of Physics: Conference Series* 318, 2011.
- [2] Feynman, R.P.; *Prog. Low Temp. Phys.* 1, 17, 1955.
- [3] Vinen, W. F. 1957 Mutual friction in a heat current in liquid helium II, I. Experiments on steady heat currents. *Proc. Roy. Soc. A* **240**, 114–127; 1957 II. Experiments on transient effects. *Proc. Roy. Soc. A* **240**, 128–136; 1957 III. Theory of the mutual friction. *Proc. Roy. Soc. A* **242**, 493–515; 1958 IV. Critical heat currents in wide channels. *Proc. Roy. Soc. A* **243**, 400–413.
- [4] Shiozaki, R.F *et al.*, Transition to quantum turbulence in finite-size superfluids, **Laser Phys. Lett.**, v.8, n 5, p. 393-397, 2011.
- [5] Seman, J.A. *et al.*, Turbulence in a trapped Bose-Einstein condensate, **Journal of Physics: Conference Series** **264**, 2011.