

DIAGRAMA DE PARÂMETROS DO MODELO DE CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN DE TRÊS POÇOS

Pietro Figueiredo ¹

Leandro Hayato Ymai ²

Resumo:

A condensação de Bose-Einstein é um estado exótico da matéria, observada quando um gás diluído de bósons é submetido a temperaturas próximas do zero absoluto. Esse fenômeno apresenta propriedades quânticas interessantes com potencial para importantes aplicações tecnológicas. O objetivo deste trabalho é obter um diagrama de parâmetros para determinar o ponto de bifurcação no modelo de um condensado de Bose-Einstein de três poços. A construção do diagrama foi realizada através de uma análise geométrica das equações de movimento e métodos numéricos. Obtivemos os valores críticos dos parâmetros nos quais se verificou a presença de uma bifurcação do ponto de equilíbrio do sistema. O resultado obtido determina o ponto de transição de fase quântica do modelo.

Palavras-chave: Condensado de Bose-Einstein; Bósons;

Modalidade de Participação: Iniciação Científica

DIAGRAMA DE PARÂMETROS DO MODELO DE CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN DE TRÊS POÇOS

¹ Aluno de graduação. pietrofigui@gmail.com. Autor principal

² Docente. leandroymai@unipampa.edu.br. Orientador



DIAGRAMA DE PARÂMETROS DO MODELO DE CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN DE TRÊS POÇOS

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno conhecido como condensação de Bose-Einstein, previsto por Albert Einstein em 1924, corresponde a um estado exótico da matéria em que grande fração de bósons em um gás diluído atinge o estado fundamental quando o gás é submetido a temperaturas extremamente baixas. Após sua confirmação experimental em 1995 (ANDERSON *et al.*, 1995), uma intensa atividade científica voltada para o desenvolvimento teórico e experimental no contexto de átomos frios foi iniciada, impulsionando importantes avanços na manipulação de grande precisão experimental de sistemas em escala atômica. Em particular, sistemas de condensados de Bose-Einstein confinados em estruturas multi-poços (YMAI *et al.*, 2017) têm atraído grande interesse da comunidade científica devido ao seu potencial de aplicação na área de computação quântica, uma vez que o problema de decoerência quântica é minimizado pela ausência de flutuações térmicas. O sistema de três poços, por exemplo, pode desempenhar o mesmo papel que um transistor, com a diferença que seu funcionamento ocorre por meio de átomos frios em vez de elétrons, sendo este sistema considerado o “transistor” mais frio do mundo. Além disso, sistemas de condensados de Bose-Einstein apresentam outros fenômenos de interesse com potencial em aplicações tecnológicas, tais como: tunelamento quântico, auto-aprisionamento e emaranhamento quântico (MILBURN *et al.*, 1997; PUDLIK *et al.*, 2013). Portanto, do ponto de vista teórico, o desenvolvimento de modelos que descrevem tais sistemas se faz necessário, podendo fornecer importantes contribuições na obtenção de uma completa compreensão de tais fenômenos.

Uma grande vantagem dos modelos teóricos atuais que descrevem condensados de Bose-Einstein é que eles possuem poucos parâmetros, permitindo que a caracterização de tais sistemas seja tratável. Em particular, informações sobre a dinâmica do sistema podem ser obtidas através do conhecimento dos valores dos parâmetros para os quais uma transição de fase ocorre. Para sistemas com um número suficientemente grande de bósons, a caracterização da transição de fase pode ser obtida pela análise clássica do modelo.

O objetivo deste trabalho é obter um diagrama de parâmetros do modelo de três poços que indique a presença de bifurcações no número de pontos críticos do sistema quando os valores dos parâmetros variam. O ponto de bifurcação poderá indicar o ponto de transição de fase quântica do modelo.

2. METODOLOGIA

No modelo de um condensado de Bose-Einstein com N bósons confinados em três poços alinhados, indicados por 1, 2 e 3, a função hamiltoniana do sistema depende da energia de interação U entre as partículas, dos potenciais externos μ e v que representam os valores associados ao efeito da manipulação externa ao sistema e da taxa de tunelamento J entre os poços. Esse modelo foi introduzido por Wilsmann (2017) no estudo sobre os efeitos da quebra da integrabilidade no modelo, o qual é integrável apenas quando $\mu = v$. Para um número N suficientemente grande

de bósons, o tratamento pode ser realizado classicamente, efetuando uma transformação canônica apropriada. Após a transformação, definimos três novos parâmetros adimensionais $\lambda = UN/J$, $\beta = \mu/J$, e $\delta = (v-\mu)/J$, e uma nova variável canônica p de interesse que mede distribuição de bósons entre os poços 1 e 3. Quanto mais próximo de 1 estiver seu valor, maior é a fração de bósons confinados no poço 1, e quanto mais próximo seu valor estiver de -1, maior é fração de bósons confinados no poço 3. A determinação das condições que indicam a presença de bifurcações no sistema foi realizada através de uma análise geométrica nas equações de movimento em torno de seus pontos críticos. Usando métodos numéricos, construímos um diagrama de parâmetros do modelo e determinamos os valores críticos dos parâmetros para os quais pode ocorrer uma transição de fase no sistema.

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO

A figura 1 (a) mostra uma curva obtida para o valor de $\delta = -0,5$, separando o espaço de parâmetros λ versus β em duas regiões. A região abaixo da curva corresponde aos valores de λ e β para os quais o sistema apresenta apenas um ponto crítico, enquanto na região acima da curva o sistema exibe três pontos críticos. A curva representa os valores de λ e β em que ocorre uma transição do número de pontos críticos de um para três. Os valores críticos dos parâmetros são representados pelas retas na figura 1 (a). A reta horizontal tracejada indica o valor crítico $\lambda = \lambda_c \approx 0,679$ e a reta vertical pontilhada indica o valor crítico $\beta = \beta_c \approx 0,084$. A figura 1 (b) mostra os valores críticos de p como função de λ e a reta vertical tracejada indica o valor de $\lambda = \lambda_c$, em que ocorre uma mudança do número de valores críticos de p de um para três. Apesar da figura (b) mostrar uma trifurcação do valor crítico de p , apenas dois ramos acima do valor λ_c são estáveis. Nesse sentido, existe uma bifurcação do valor crítico estável de p quando variamos os valores de λ .

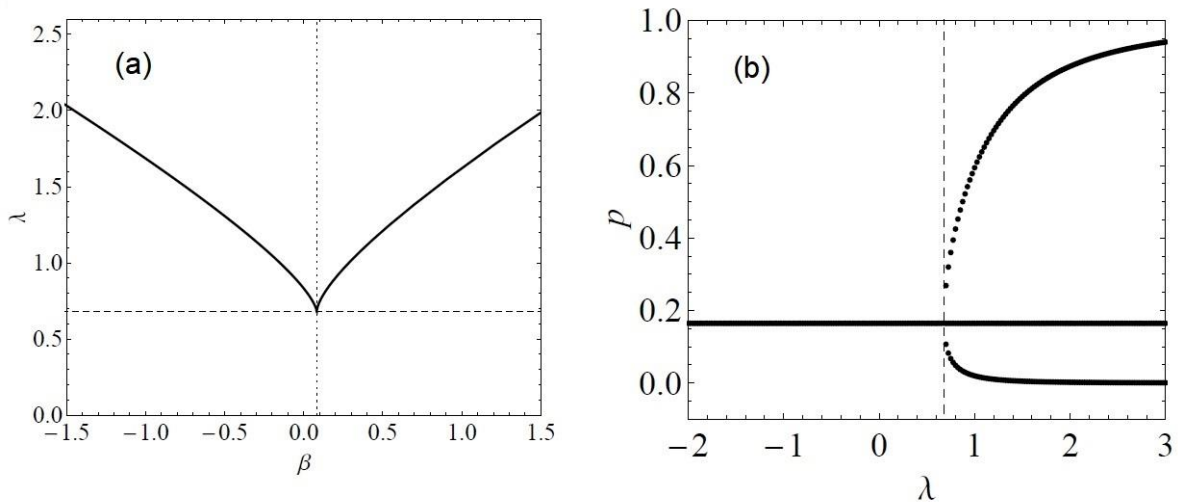


Figura 1. (a) Diagrama de parâmetros λ versus β . (b) Valores críticos da variável p versus λ .

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado neste trabalho permitiu a obtenção do diagrama de parâmetros λ versus β , que poderá fornecer informações importantes sobre as

mudanças na dinâmica do sistema quando esses parâmetros variam. Em particular, para $\delta = -0,5$ determinamos os valores críticos dos parâmetros $\lambda_c \approx 0,679$ e $\beta_c \approx 0,084$. Embora a análise realizada tenha sido conduzida através de um formalismo hamiltoniano clássico, os valores críticos dos parâmetros obtidos pela análise também servem para determinar o ponto de transição de fase quântica. Isso poderá ser verificado, por exemplo, realizando um estudo sobre a variação da diferença de energia do primeiro estado excitado e o estado fundamental do sistema pela variação de um dos parâmetros. Um estudo subsequente sobre a dinâmica quântica poderá ser realizado em torno dos valores críticos para investigar outros fenômenos no sistema, tais como auto-aprisionamento e emaranhamento quântico.

5. REFERÊNCIAS

ANDERSON, M. H.; ENSHER, J. R.; MATTHEWS, M. R.; WIEMAN, C. E.; CORNELL, E. A. Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor. *Science*, v. 269, p.198-201, 1995.

MILBURN, G. J.; CORNEY, J.; WRIGHT, E. M.; WALLS, D. F. Quantum dynamics of an atomic Bose-Einstein condensate in a double-well potential. *Physical Review A*, v.55, n.6, p.4318-4324, 1997.

PUDLIK, T.; HENNIG, H.; WITTHAUT, D.; CAMPBELL, D. K. Dynamics of entanglement in a dissipative Bose-Hubbard dimer. *Physical Review A*, v.88, n.6, p.1-11, 2013.

WILSMANN, K. W. Quebra da integrabilidade para um modelo de tunelamento quântico de três poços. 68f. 2017. Dissertação (Mestrado em Física), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

YMAI, L. H.; TONEL, A. P.; FOERSTER, A.; LINKS, J. Quantum integrable multi-well tunneling models. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, v. 50, n.26, p.1-13, 2017.