

# PRINCÍPIO DA INCERTEZA

Mateus Mendonça Ramos Simões

10818477

**RESUMO:** O princípio da incerteza de Heisenberg é intrínseco a qualquer medida ondulatória. Com uma caixa de som e um microfone foi possível verificar o princípio para ondas sonoras. Com um laser, uma fenda ajustável por um micrômetro e um anteparo também foi possível fazer essa verificação em ondas eletromagnéticas.

## 1-INTRODUÇÃO

O princípio da incerteza surge da interpretação probabilística fundamental na mecânica quântica. Num primeiro instante supôs-se que as relações de incerteza eram advindas da indeterminação das perturbações no sistema provenientes da interação com os instrumentos de medição. Contudo, Heisenberg reconheceu posteriormente que as relações de indeterminação eram intrínsecas às leis quânticas que governam a equação de onda. [1,2]

Ao se aplicar a transformada de Fourier (FFT) a um pacote de ondas, usar a característica de que o produto entre os desvios padrões de distribuições gaussianas sendo uma o resultado da FFT da outra é sempre maior ou igual a  $1/2$  ( $\sigma_x \sigma_k \geq 1/2$ ) e usando a relação de de Broglie ( $p = h\nu/c$ ) chega-se a relação do princípio da incerteza dada pela Equação 1. [3]

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

Usando a relação de Einstein ( $E=h\nu$ ), chega-se a uma relação do princípio da incerteza dada pela energia e pelo tempo dada pela Equação (2) [4].

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

Este experimento teve por objetivo estudar o princípio da incerteza de Heisenberg em ondas acústicas e num sistema de fenda simples com largura variável.

## 2- MATERIAIS E MÉTODOS

O esquema do experimento montado para o estudo com ondas acústicas está na Figura 1. Usando um gerador de função em 200Hz foi registrada a amplitude da onda com um microfone por diferentes tempos de pacotes de onda (1s, 5s, 10s, 15s, 20s, 25s, 30s, 35s, 40s, 45s e 50s). O sinal era registrado pelo Software Sound Recorder. O arquivo de áudio era importado no Origin 8.5, o sinal era cortado no intervalo de interesse, era aplicada FFT do sinal e por fim ajustava-se uma lorentziana para se obter a largura de banda a meia altura (FWHM). O procedimento foi aplicado a 4 disposições de frequências descomhe-

cidas. Com valores de tempo e energia foi possível verificar o princípio da incerteza usando a relação 2.

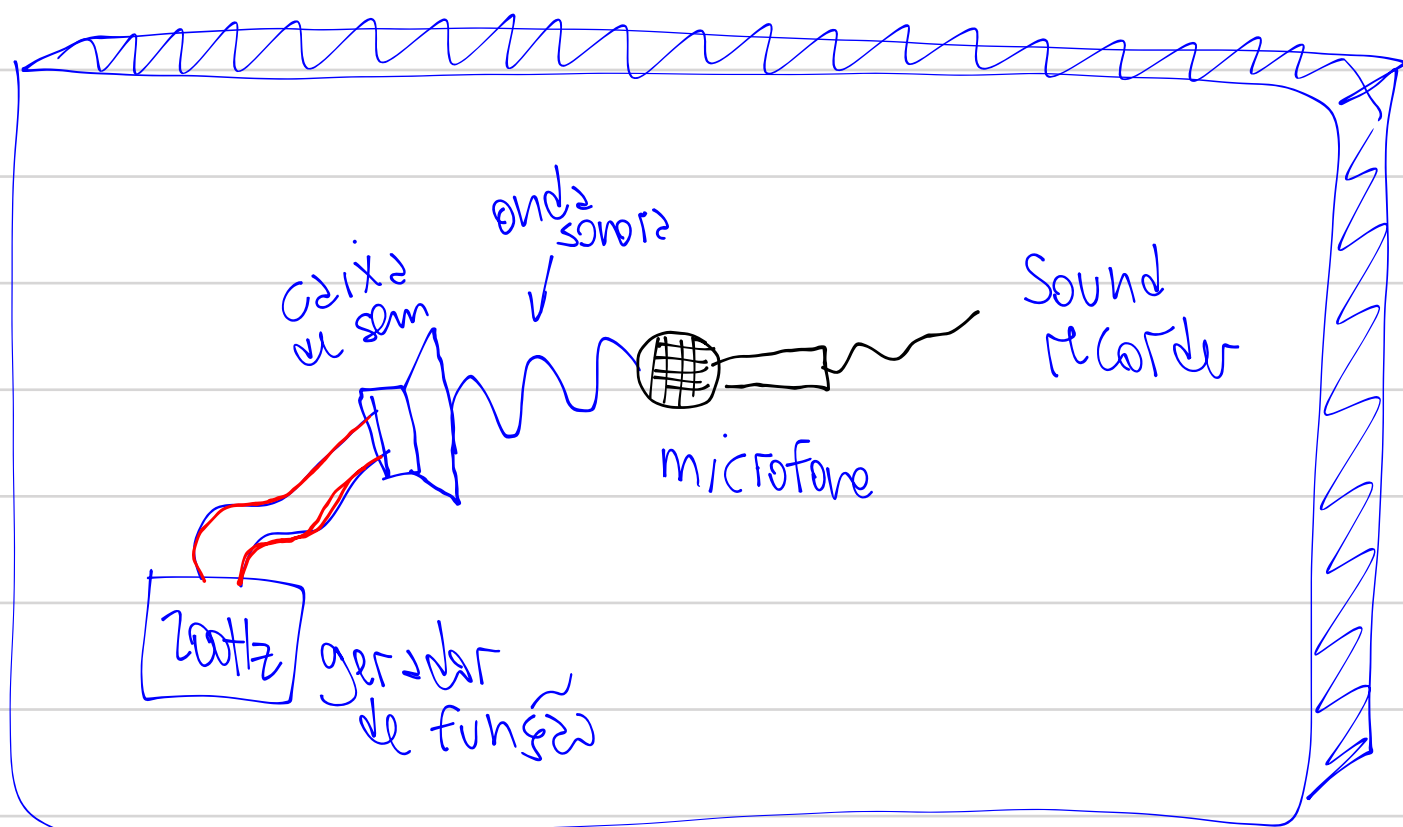


Figura 1: Esquema do experimento para ondas sonoras.

Para o estudo de ondas eletromagnéticas foi usado um laser, uma fenda cuja abertura era feita por um deslocador micrométrico e uma régua e um paquímetro para medir os valores de máximo na difração. Variava-se a abertura da fenda em passos de 5mm e mediu-se a distância entre os máximos do padrão de difração. Usando a abertura da fenda como a variação de posição  $\Delta x$  da partícula, usando o fato que o momento  $p_y$  do feixe é nulo na fenda e diferente de zero ao atingir o anteparo, juntamente com a relação de De Broglie, pode-se usar a equação 1 para avaliar o princípio da incerteza. O arranjo experimental está esquematizado na Figura 2.

A referência [2] é mais rigorosa com o princípio da incerteza  $\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$  enquanto [5] usa



A Tabela 1 mostra os valores obtidos para todos os intervalos de tempo.

Tabela 1: Dados obtidos para o experimento swnr.

#	$\Delta t$ (s)	Pico (Hz)	FWHM (Hz)	$\Delta E$ ( $10^{-34}$ J)	$\Delta E \times \Delta t$ ( $10^{-34}$ J.s)	$\hbar/2$ ( $10^{-34}$ J.s)
1	1	199.8012	0.54543	3.61406	3.614057	1.054572
2	5	199.7991	0.26360	1.74663	8.73316	1.054572
3	10	199.8996	0.17237	1.14214	11.42136	1.054572
4	15	199.8661	0.04604	0.30506	4.575964	1.054572
5	20	199.8496	0.05929	0.39286	7.857194	1.054572
6	25	199.8396	0.05902	0.39107	9.776766	1.054572
7	30	199.8662	0.04831	0.32011	9.603163	1.054572
8	35	199.8568	0.01217	0.08064	2.822375	1.054572
9	40	199.3726	1.84024	12.19356	487.7424	1.054572
10	45	199.8440	0.03837	0.25424	11.4409	1.054572
11	50	199.8397	0.04004	0.26531	13.26539	1.054572

O valor da frequência de pico deu um valor médio de  $(199,8 \pm 0,1)$  Hz condizente com o cabo- cabo no gerador de ondas. Os valores de FWHM eram para diminuir com o aumento de  $\Delta t$ . Isso ocorreu com exceção de  $\Delta t = 40$  s, provavelmente por algum erro de medição. Todos os valores de  $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$  respeitando o princípio da incerteza.

A figura 4 contém os gráficos de pulsos, a FFT e o ajuste com a lorentziana para os quatro diapásos usados no experimento.

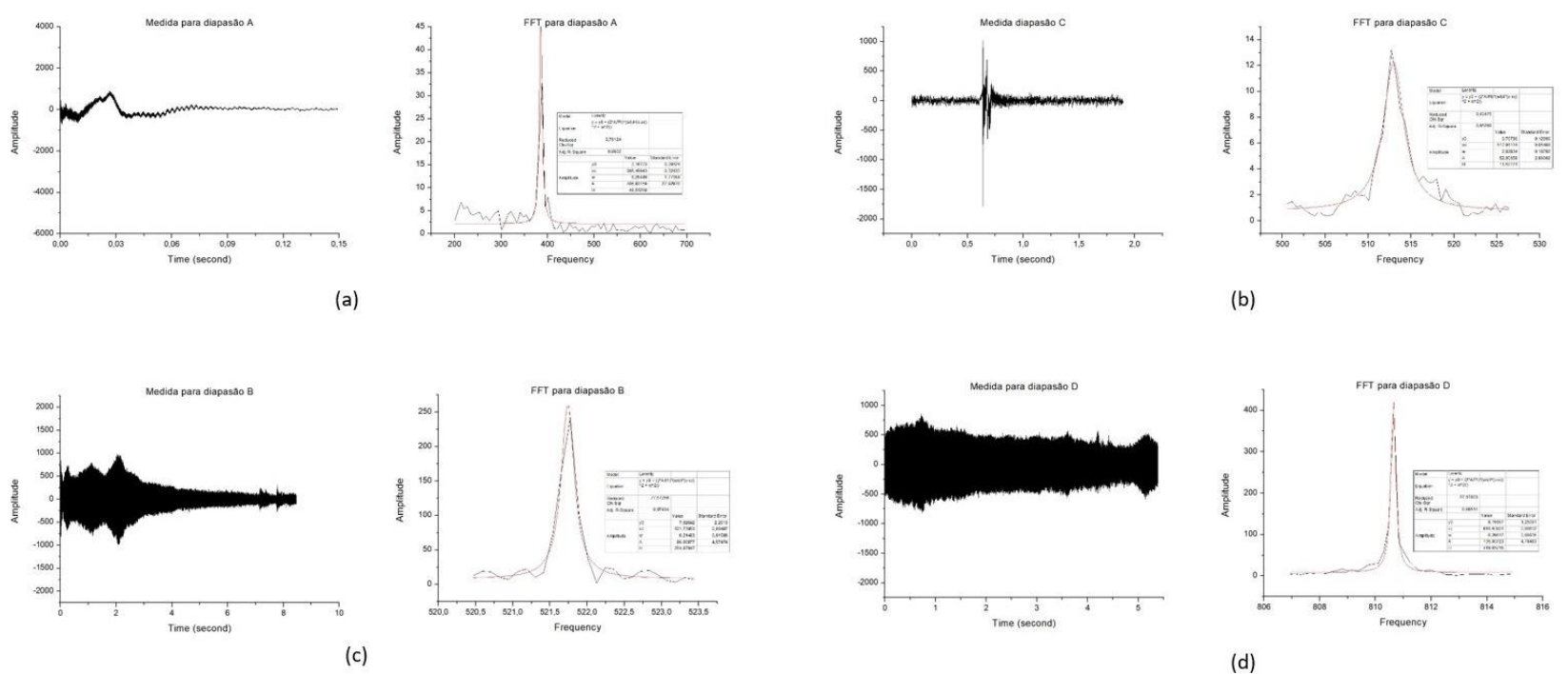


Fig. 4: Pulso e FFT para os diapásos.

A Tabela 2 contém os valores obtidos para  $\Delta t$ , pico de frequência e FWHM, e as estimativas para a verificação do princípio de incerteza. Observe  $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$ .

Tabela 2: Medidas para os diapásos.

Diapasão	$\Delta t$ (s)	Pico (Hz)	FWHM (Hz)	$\Delta E$ ( $10^{-34}$ J)	$\Delta E \times \Delta t$ ( $10^{-34}$ J.s)	$\hbar/2$ ( $10^{-34}$ J.s)
A	0.1495	387.8393	6.25449	41.44269	6.195682	1.054572
B	8.4596	521.7704	0.21483	1.42348	12.04206	1.054572
C	1.2560	512.7047	2.92834	19.40339	24.37065	1.054572
D	5.3833	810.6570	0.20617	1.36610	7.354109	1.054572

Com o valor da frequência de pico e a tabela de referência [6], o diapásos A é um  $G_3$ , o diapásos B é um  $C_4$ , o diapásos C está entre  $B_3$  e  $C_4$ , e o diapásos D é um  $G\#_4$ .

Agora, passa-se a discussão do experimento com ondas eletromagnéticas (OEM). A Figura 5 mostra o gráfico da variação da largura do máximo de difração em função da largura da fenda.

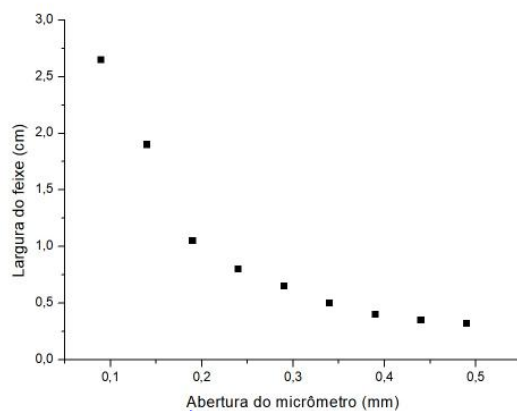


Fig 5: Medidas para OEM.

Na Tabela 3 estão os dados para OEM obtidos e a verificação do princípio de incerteza.

Tabela 3: Dados para OEM.

#	$\Delta y$ (mm)	D (cm)	$\lambda$ (nm)	$p_y$ ( $J.s.nm^{-1}$ )	$p_y \times \Delta y$ ( $10^{-32}$ J.s)	$\hbar/2$ ( $10^{-34}$ J.s)
1	0.09	2.65	691	0.009596	8.636	1.054572
2	0.14	1.90	770	0.008604	12.045	1.054572
3	0.19	1.05	578	0.011472	21.797	1.054572
4	0.24	0.80	556	0.011920	28.608	1.054572
5	0.29	0.65	546	0.012141	35.210	1.054572
5	0.34	0.50	492	0.013463	45.773	1.054572
6	0.39	0.40	452	0.014671	57.216	1.054572
7	0.44	0.35	446	0.014861	65.390	1.054572
8	0.49	0.32	454	0.014596	71.520	1.054572

Pod-se observar duas coisas pela Fig. 5 e a Tabela 3. A distância entre os picos do padrão de difração, mostrando o processo de transição entre a óptica física e a óptica geométrica. Além disso, o princípio da incerteza é verificável por este método para os 8 pontos medidos.

A Figura 6 mostra um esquema do microscópio de Bohr. Nesta experiência mental, Bohr quis mostrar a imprevisibilidade da medida por causa da perturbação no sistema resultante da observação ocasionando resultados probabilísticos de ocorrência [1,4].

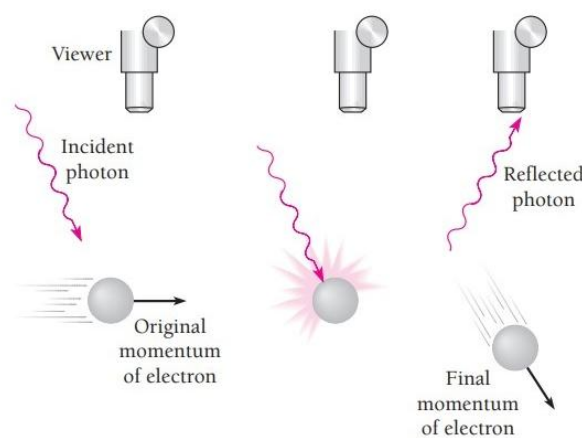


Fig 6: Ilustração do microscópio de Bohr [4]

Caso fosse usado um feixe de elétrons no lugar de um laser não ocorreria difração pois o comprimento de onda seria da ordem de  $\text{Å}$ , três ordens de grandeza abaixo da abertura de  $\text{mm}$  da fenda.

Em relação aos experimentos com ondas sonoras, para se obter a melhor relação  $\Delta E \cdot \Delta t$ , seria necessário um pacote de ondas com  $\Delta t$  de algumas horas pois obter-se-ia um  $\Delta E$  pequeno e mais preciso.

#### 4- CONCLUSÃO

Com o experimento de ondas sonoras foi possível se verificar o princípio da incerteza e também é um método para se determinar o tom musical de uma nota. O experimento com DEM também se mostrou válido para verificar o mesmo princípio.

## 5-REFERÊNCIAS

[1] EISBERG; "Física Quântica". 1ed. 1979

[2] BARTELL; "Perspectives on the Uncertainty Principle and Quantum Reality." J. of Chem. Educ. v62, n3, 1985.

[3] Tipler; "Modern Physics". 6 ed. 2012

[4] BEISER; "Concepts of Modern Physics". 6 ed. 2003

[5] SAWICKI; "Simple Uncertainty-Principle Experiment." The Physics Teacher. v41, 2003

[6] IAZZETTA; "Tabela de Frequências, Periódicos e Comprimentos de Onda." Disponível em: <[www2.ec2.usp.br/prof/iazzetta/tutor/acustica/introducao/tabela1.html](http://www2.ec2.usp.br/prof/iazzetta/tutor/acustica/introducao/tabela1.html)>. Acesso em: 18 out. 2020