

Princípio da Incerteza

Lucas da Costa
Universidade de São Paulo
lucas da costa @usp.br

Resumo

O experimento tem como objetivo comprovar o princípio da incerteza de Heisenberg, por meio de dois experimentos, usando ondas acústicas e por meio de ondas eletromagnéticas. Para o experimento com ondas acústicas foi utilizado um grader de funções com uma frequência fixa e disposições diversas, para todas elas foram realizadas a FFT para a análise do espaço de frequências. Para as ondas eletromagnéticas foi estudado o fenômeno de difração por fendas simples, variando a abertura da fenda. Por meio da diferença de frequências foi possível associar com $\Delta E \Delta t$ e então provar o princípio para as ondas acústicas, enquanto que para as ondas eletromagnéticas foi necessário recorrer à lei de De Broglie para encontrar o Δp_x e Δp_y , estando em concordância com Heisenberg.

I. Introdução

O Princípio da Incerteza criado por Heisenberg foi determinante para se dar o caráter probabilístico da mecânica quântica em oposição ao determinismo da mecânica clássica [2]. O princípio da incerteza foi apresentado pela primeira vez em 1927 por Werner Heisenberg, ele determina que quanto mais a posição ao se deter-

menor a posição, menor sua a precisão para o momento e vice-versa. A equação relacionando o desvio padrão da posição e o desvio padrão do momento foi encontrada por Erwin Schrödinger e Hermann Weyl.

$$\sigma_x \sigma_p \geq \frac{\hbar}{2}$$

O experimento tem como objetivo verificar a validade do princípio da incerteza por meio de ondas acústicas e por meio de ondas eletromagnéticas.

II. Materiais e Métodos

Para a realização do experimento foram divididas em duas partes, a primeira lidando apenas com ondas mecânicas e a segunda a partir de ondas eletromagnéticas, para as ondas mecânicas foram utilizadas diferentes fontes sonoras, entre elas um gerador de funções e uma caixa de som com frequência variável junto a um interruptor, além desta fonte foram utilizadas diapasões com freq. fixas.

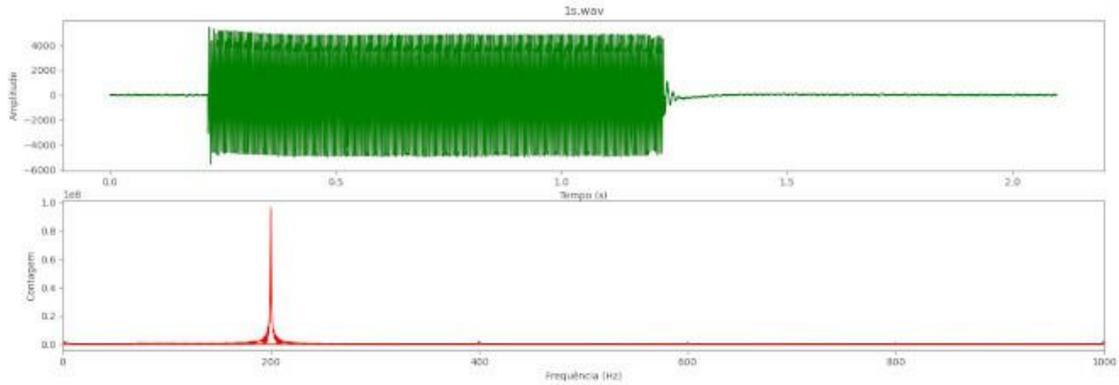
Os sons foram gravados com um microfone acoplado a placa de som do computador, registrando a amplitude ao longo do tempo. Foram gravados 10 valores diferentes de tempo para uma freq. fixa de 200Hz, então foi analisado o AEA.

Para a análise do AEA foi necessário aplicar a transformada Fourier nos sons, que foi realizado através de script escrito em python.

Para as ondas eletromagnéticas foi necessário recorrer à teoria referente à difração por uma fenda simples, assim sendo possível determinar o comprimento de onda e com este pela lei de De Broglie encontrar o p_y .

III. Resultados

Após a gravação dos sons foi necessário aplicar a transformada de Fourier para encontrar a frequência dominante em questão, as graficas resultantes desse procedimento estão dados abaixo:



Para as ondas sonoras gravadas com um gerador de funções e uma caixa de som de frequência variável temos a seguinte tabela de $\Delta f \Delta t$

Som	Δf (Hz)	$\Delta f \Delta t$
1s	1,291	1,291
5s	0,312	1,56
10s	0,151	1,51
15s	0,072	1,08
20s	0,066	1,32
25s	0,067	1,675
30s	0,039	1,17
35s	0,028	0,98
40s	0,034	1,36
45s	0,029	1,305
50s	0,020	1

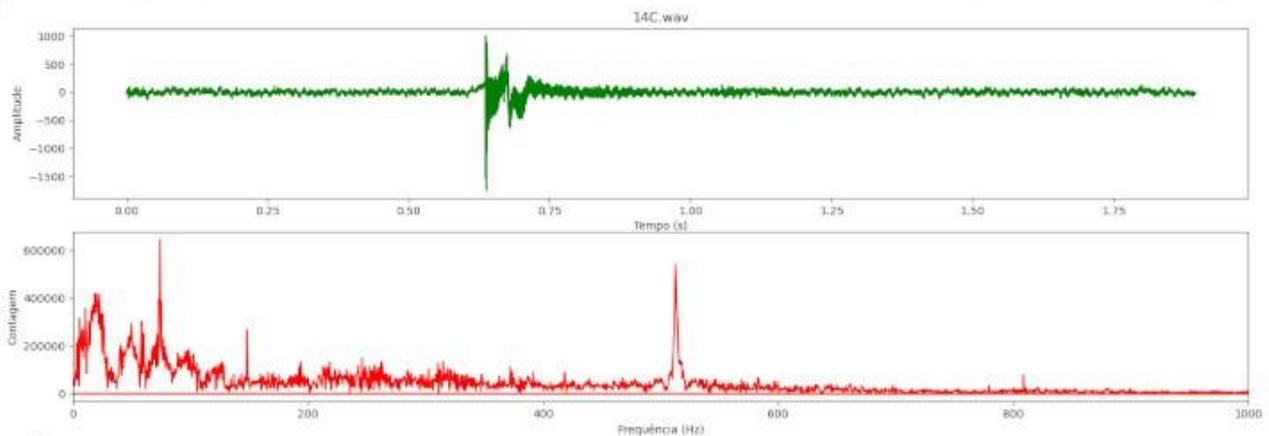
Que está de acordo com o esperado, uma vez que utilizando $E = hf$ segue de:

$$\Delta E \Delta t \geq h \Rightarrow \Delta f \Delta t \geq 1$$

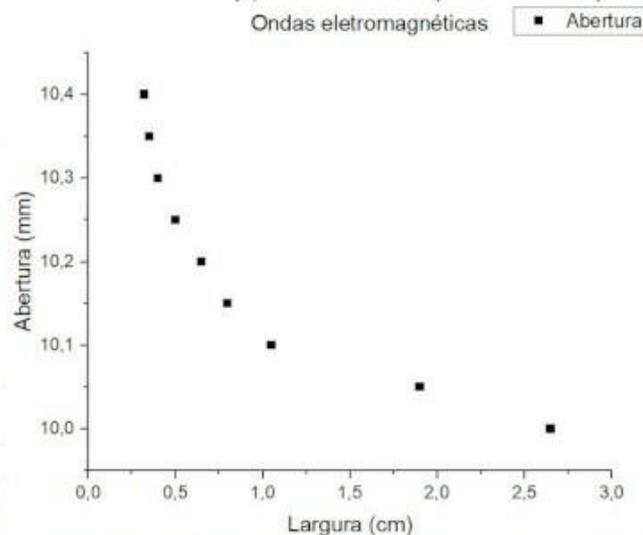
35_h Assim percebemos que apenas o valor encontrado para $\Delta f \Delta t$ que não está de acordo com o esperado para o princípio da incerteza. Para as diapasões tivemos os seguintes dados coletados:

Diapasão	Frequência de pico (Hz)	$\Delta f \Delta t$
14A	74,6	1,35
14B	521,7	2,61
14C	514,2	4,38
14D	810,6	1,83

A análise das FFT referentes aos diapasões tiveram uma maior incerteza devido ao ruído presente no áudio, como podemos verificar abaixo:



Para a análise dos dados podemos perceber que à medida que a abertura diminui, a largura do feixe difratado aumenta.



Analisando as dados presentes no gráfico acima, podemos através da equação (2) determinar o comprimento de onda deste feixe.

$$\lambda = (A_{\text{abertura do feixe}}) \sin(\theta)$$

Em que podemos calcular o $\sin(\theta)$ por:

$$\sin(\theta) = \frac{C.O.}{\text{hip.}} = \frac{\text{Largura}}{2D} \times \frac{1}{D^2 + \left(\frac{\text{Largura}}{2}\right)^2}$$

Assim, através da lei de De Broglie associamos o comprimento de onda com p_y e construímos a seguinte tabela de dados:

Δy (m)	λ (10^{-5} m)	Δp_y (10^{-32})	$\Delta p_y \Delta y$ (10^{-34})
0,01000	7,67	6,63	17,6
0,01005	5,53	6,60	12,5
0,01010	3,07	6,54	6,89
0,01015	2,35	6,53	5,23
0,01020	1,92	6,50	4,23
0,01025	1,48	6,46	3,23
0,01030	1,19	6,44	2,57
0,01035	1,05	6,41	2,24
0,01040	0,96	6,37	2,04

Assim temos que o valor de $\Delta p_y \Delta y$ é bem maior do que o valor de $\hbar/2$ que é igual a $5,27 \cdot 10^{-35}$ J.s.

IV Discussão

Ao se analisar os dois procedimentos realizados, podemos

Nota-se que ambas respeitaram o princípio da incerteza. Primeiramente para as sons mecânicas é necessário que haja uma boa limitação do Δt que pode ser uma fonte de erro para a posterior análise, também foi impresso estudar os diagramas uma vez que as sons coletadas tiveram ruídos de baixa frequência que obrigaram a uma seleção de uma área de interesse para a análise da transformada. Para as ondas eletromagnéticas de modo análogo, tiveram um comportamento como o esperado teoricamente, estando todos os valores calculados de $\Delta p_y \Delta y$ acima de $5,27 \cdot 10^{-35} \text{ J.s.}$

V. Conclusão

Por fim concluímos que foi possível provar o princípio da incerteza para dois fenômenos de naturezas distintas, o primeiro sendo realizado por meio de sons mecânicos e o segundo por meio da análise de ondas eletromagnéticas.

Para ambas as experiências comprovaram o princípio da incerteza, estando na maioria das vezes de acordo. Somente para a onda mecânica de 35s não foi possível somente confirmar o princípio pois neste caso provavelmente houve um erro por parte da estimativa do Δt na FFT.

Referências

- [1] Rotero Experimental
- [2] Eisberg e Resnick, "Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Nucleares e Partículas", Sexta Edição.

Princípio da Incerteza

LUCAS DA COSTA
Universidade de São Paulo
lucasdacosta@usp.br

Resumo

O experimento tem como objetivo comprovar o princípio da incerteza de Heisenberg, por meio de dois experimentos, através de ondas acústicas e por meio de ondas eletromagnéticas. Para o experimento com ondas acústica foi utilizado um gerador de funções com uma frequência fixa e diapasões diversos, para todos eles foram realizados a FFT para a análise do espaço de frequências. Para as ondas eletromagnéticas foi estudado o fenômeno de difração por fenda simples, variando a abertura da fenda. Por meio da diferença de frequência foi possível associar com $\Delta E \Delta t$ e então provar o princípio para as ondas acústicas, enquanto que para as ondas eletromagnéticas foi necessário recorrer à lei de De Broglie para encontrar o Δp_y e após $\Delta p_y \Delta y$, estando em concordância com Heisenberg.

I. INTRODUÇÃO

O Princípio da Incerteza criado por Heisenberg foi determinante para se dar o caráter probabilístico da mecânica quântica em oposição ao determinismo da mecânica clássica [2]. O princípio da incerteza foi apresentado pela primeira vez em 1927 por Werner Heisenberg, ela determina que quanto maior a precisão ao se determinar a posição, menor seria a precisão para o momento e vice-versa. A equação relacionando o desvio padrão da posição e o desvio padrão do momento foi encontrada por Earle Hesse Kennard e Hermann Weyl.

$$\sigma_x \sigma_p \geq \frac{h}{2} \quad (1)$$

O experimento tem como objetivo verificar a validade do princípio da incerteza por meio de ondas acústicas e por meio de ondas eletromagnéticas.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do experimento foram divididos em duas partes, a primeira lidando apenas com ondas mecânicas e a segunda a partir

de ondas eletromagnéticas, Para as ondas mecânicas foram utilizados diferentes fontes sonoras, entre elas um gerador de função e uma caixa de som com frequência variável junto a um interruptor, além desta fonte foram utilizados diapasões com frequências fixas.

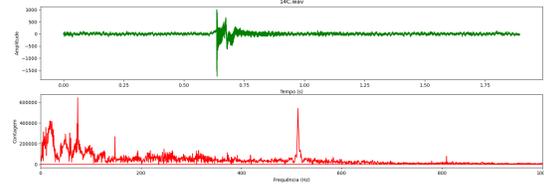
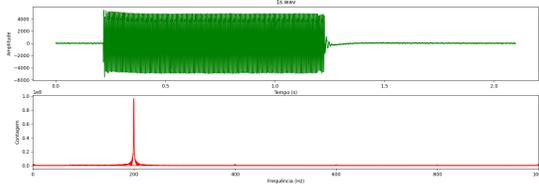
Os sons foram gravados com um microfone acoplado a placa de som do computador, registrando a amplitude ao longo do tempo. Foram gravados 10 valores diferentes de tempo para uma frequência fixa de 200 Hz, então foi analisado $\Delta E \Delta t$

Para a análise do Δf foi necessário aplicar a transformada de Fourier nos sons, que foi realizado através de script escrito em python.

Para as ondas eletromagnéticas foi necessário recorrer à teoria referente à difração por uma fenda simples, assim sendo possível determinar o comprimento de onda e com este pela lei de De broglie encontrar o p_y .

III. RESULTADOS

Após a gravação dos sons foi necessário aplicar a transformada de Fourier para encontrar a frequência dominante em questão, os gráficos resultantes desse procedimento estão dados abaixo:



Para as ondas sonoras gravadas com um gerador de funções e uma caixa de som de frequência variável temos coletado a seguinte tabela de $\Delta f \Delta t$:

Som	Δf (Hz)	$\Delta f \Delta t$
1s	1,291	1,291
5s	0,312	1,56
10s	0,151	1,51
15s	0,072	1,08
20s	0,066	1,32
25s	0,067	1,675
30s	0,039	1,17
35s	0,028	0,98
40s	0,034	1,36
45s	0,029	1,305
50s	0,020	1

Que está de acordo com o esperado uma vez que utilizando $E = hf$ segue de

$$\Delta E \Delta t \geq h \Rightarrow \Delta f \Delta t \geq 1$$

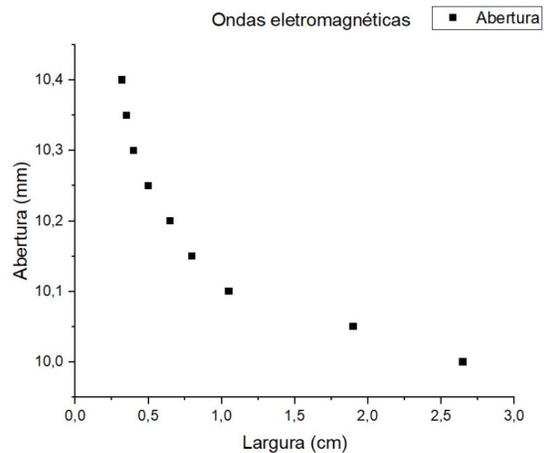
Assim percebemos que apenas o valor encontrado para 35s que não está de acordo com o esperado para o princípio da incerteza.

Para os diapasões tivemos os seguintes dados coletados:

Diapasão	Frequência de pico (Hz)	$\Delta f \Delta t$
14A	74,6	1,35
14B	521,7	2,61
14C	514,2	4,38
14D	810,6	1,83

A análise das FFT referentes aos diapasões tiveram uma maior incerteza devido ao ruído presente no audio, como podemos verificar abaixo:

Para a análise dos dados podemos perceber que à medida que a abertura diminui, a largura do feixe difratado aumenta.



Analisando os dados presentes no gráfico acima, podemos através da equação () determinar o comprimento de onda deste feixe.

$$\lambda = (A_{\text{abertura do feixe}}) \sin(\theta) \quad (2)$$

Em que podemos calcular o $\sin(\theta)$ por:

$$\sin(\theta) = \frac{C.O.}{Hip} = \frac{Largura}{2} * \frac{1}{D^2 + (\frac{Largura}{2})^2}$$

Assim, através da lei de De Broglie associamos o comprimento de onda com o p_y e construímos a seguinte tabela da dados:

Δy (m)	λ (10^{-5} m)	Δp_y (10^{-32})	$\Delta p_y \Delta y$ (10^{-34})
0,01000	7,67	6,63	17,6
0,01005	5,53	6,60	12,5
0,01010	3,07	6,54	6,89
0,01015	2,35	6,53	5,23
0,01020	1,92	6,50	4,23
0,01025	1,48	6,46	3,23
0,01030	1,19	6,44	2,57
0,01035	1,05	6,41	2,24
0,01040	0,96	6,37	2,04

REFERÊNCIAS

- [1] Roteiro Experimental.
- [2] Eisberg e Resnick, *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*, Sexta Edição.

Assim temos que o valor de $\Delta p_y \Delta y$ é bem maior do que o valor de $\hbar/2$ que é igual a $5,27 * 10^{-35}$ J.s.

IV. DISCUSSÃO

Ao se analisar os dois procedimentos realizados, podemos notar que ambos respeitaram o Princípio da Incerteza. Primeiramente para os sons mecânicos é necessário que haja uma boa limitação do Δt que pode ser uma fonte de erro para a posterior análise, também foi impreciso estudar os diapasões uma vez que os sons coletados tiveram ruídos de baixa frequência que obrigaram a uma seleção de uma área de interesse para a análise da transformada.

Para as ondas eletromagnéticas de modo análogo, tiveram um comportamento como o esperado teoricamente, estando todos os valores calculados de $\Delta p_y \Delta y$ acima de $5,27 * 10^{-35}$ J.s.

V. CONCLUSÃO

Por fim concluímos que foi possível provar o princípio da incerteza para dois fenômenos de naturezas distintas, o primeiro sendo realizado por meio de sons mecânicos e o segundo por meio da análise de ondas eletromagnéticas.

Para ambos os experimentos comprovaram o princípio da incerteza, estando na maioria dos casos de acordo. Somente para a onda mecânica de 35s não foi possível confirmar o princípio pois neste caso provavelmente houve um erro por parte da estimação do Δf na FFT.