

*Instituto de Física*  
*USP*

*Física V - Aula 28*

**Professora: Mazé Bechara**

# *Aula 28 – Princípio de incerteza de Heisenberg – interpretação e consequências*

1. O princípio de incerteza de Heisenberg e suas consequências e suas consequências mais evidentes.
2. O cálculo da energia mínima do MHS usando princípio de incerteza. Comparação com o resultado de Planck e da quantização de Wilson Sommerfeld. **Estimativa da energia mínima do átomo de hidrogênio a partir do princípio de incerteza.** Comparação com resultado de Bohr.

# O Princípio de Incerteza ou de Indeterminação de Heisenberg: relações de de Broglie nas relações de dispersão mínima de onda

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta p_y \Delta y \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta p_z \Delta z \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Sendo  $\Delta x^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$

# *O princípio de indeterminação de Heisenberg ou a interpretação da dispersão na onda da partícula material.*

- **$\Delta x$  é interpretado como uma indeterminação intrínseca da natureza física** (não do experimento) na coordenada de posição da partícula, como  **$\Delta p_x$  é uma indeterminação intrínseca na componente x do momento linear.**
- Assim, **a relação de dispersão da onda de partícula diz da impossibilidade de se ter no mesmo instante um conhecimento real (teórico) com precisão infinita de uma coordenada e seu momento associado, ou seja,  $\Delta x=0$  e  $\Delta p_x=0$ , mesmo que pudéssemos fazer um experimento com indeterminação zero!**
- **Daí o nome de princípio de indeterminação ou de incerteza.**

# *O Princípio de Indeterminação de Heisenberg ou a interpretação da dispersão na onda da partícula material.*

- $\Delta E$  é interpretado como uma indeterminação intrínseca da natureza física (não do experimento) na energia do estado da partícula-onda assim como  $\Delta t$  é o intervalo de tempo no qual a partícula-onda permanece sem mudanças no seu estado físico. Observe que o instante  $t$ , diferentemente da posição, momento linear e energia, não é uma grandeza dinâmica, mas um parâmetro da mudança nas grandezas dinâmicas.
- Assim, a relação de dispersão da onda de partícula diz da impossibilidade de se ter no mesmo instante um conhecimento real (teórico) com precisão infinita da energia e do intervalo de tempo no qual o estado físico tem essa energia, ou seja, a impossibilidade de  $\Delta E=0$  e  $\Delta t=0$ , mesmo que pudéssemos fazer uma medida com incerteza experimental nula!

# O princípio de incerteza ou de indeterminação de Heisenberg.

Consequências óbvias:

$$\text{Se } \Delta p_x \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta x \rightarrow \infty$$

$$\text{Se } \Delta p_y \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta y \rightarrow \infty$$

$$\text{Se } \Delta p_z \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta z \rightarrow \infty$$

Obs. Importantes:

1. Não há restrições aos valores de  $\Delta p_x$  em relação aos  $\Delta y$  ou  $\Delta z$ .
2. Cuidado com o **tempo**: na Física de baixas velocidades (não relativística) ele não é uma grandeza aleatória como a posição.

No caso da relação da energia se  $\Delta E \rightarrow 0$  significa que  $\Delta t = \tau \rightarrow \infty$ , ou seja, o estado com energia de “largura natural” nula permanece um tempo infinito nesta energia. **Na teoria todos os estados estacionários obedecerem  $\tau \rightarrow \infty$ . Na natureza só o estado fundamental (de átomos/núcleos estáveis) tem esta duração infinita.**

# Consequências do Princípio de Incerteza

1. O que o princípio de incerteza diz sobre uma partícula parada?
2. Em função à sua resposta ao item 1, o que o princípio de incerteza diz sobre a temperatura mínima da matéria ?
3. Use o o princípio de incerteza para determinar a mínima energia do MHS unidimensional. Como tal energia se compara com o resultado de Planck e de Wilson-Sommerfeld? Qual deve ser o resultado “completo”?
4. Determine a mínima energia no MHS tridimensional. Como tal energia se compara com o resultado de Planck e de Wilson-Sommerfeld?

# *Questões que precisam ser respondidas*

5. Se todos os estados de Wilson-Sommerfeld para o átomo de H e para o MHS têm energias bem definidas, o que concluir sobre a relação energia-tempo destes estados de acordo com o princípio de incerteza?
6. Se a meia vida de um estado atômico do átomo de H é  $10^{-10}$ s, qual é a incerteza na energia deste estado excitado? E qual é a incerteza na energia do estado fundamental?
7. Qual a conclusão sobre as trajetórias do átomo de H e do MHS, com base no princípio de incerteza?