

*Instituto de Física*  
*USP*

*Física V - Aula 27*

**Professora: Mazé Bechara**

# *Aula 27 – O princípio de de incerteza de Heisenberg – entendimento e consequências – Aula trabalho.*

1. Postulado sobre a existência de funções de onda de uma partícula em dinâmica uni, bi ou tridimensional e o significado físico delas (devido à Max Born).

# *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 assim 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: 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  $\Delta x^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$

# 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. O que diz o princípio de incerteza sobre a energia mínima do MHS unidimensional? Como tal energia se compara com o resultado de Planck e de Wilson-Sommerfeld?
4. O que diz o princípio de incerteza sobre o 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 diz o princípio de incerteza sobre a relação energia-tempo destes estados?
6. Se a meia vida de um estado atômico do átomo de H é  $10^{-8}$ s, qual é a incerteza na energia deste estado excitado? E qual é a incerteza na energia do estado fundamental ?
7. O que diz o princípio de incerteza sobre a energia mínima do átomo de H? Como tal resultado se compara com a energia mínima segundo Bohr ?
8. O que o princípio de incerteza diz sobre as trajetórias do átomo de H e do MHS ?

# Questões que precisam ser respondidas

9. Como você classificaria Os sistemas que
6. Se a meia vida de um estado atômico do átomo de H é  $10^{-8}$ s, qual é a incerteza na energia deste estado excitado? E qual é a incerteza na energia do estado fundamental ?
7. O que diz o princípio de incerteza sobre a energia mínima do átomo de H? Como tal resultado se compara com a energia mínima segundo Bohr ?
8. O que o princípio de incerteza diz sobre as trajetórias do átomo de H e do MHS ?

=

# 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!**