

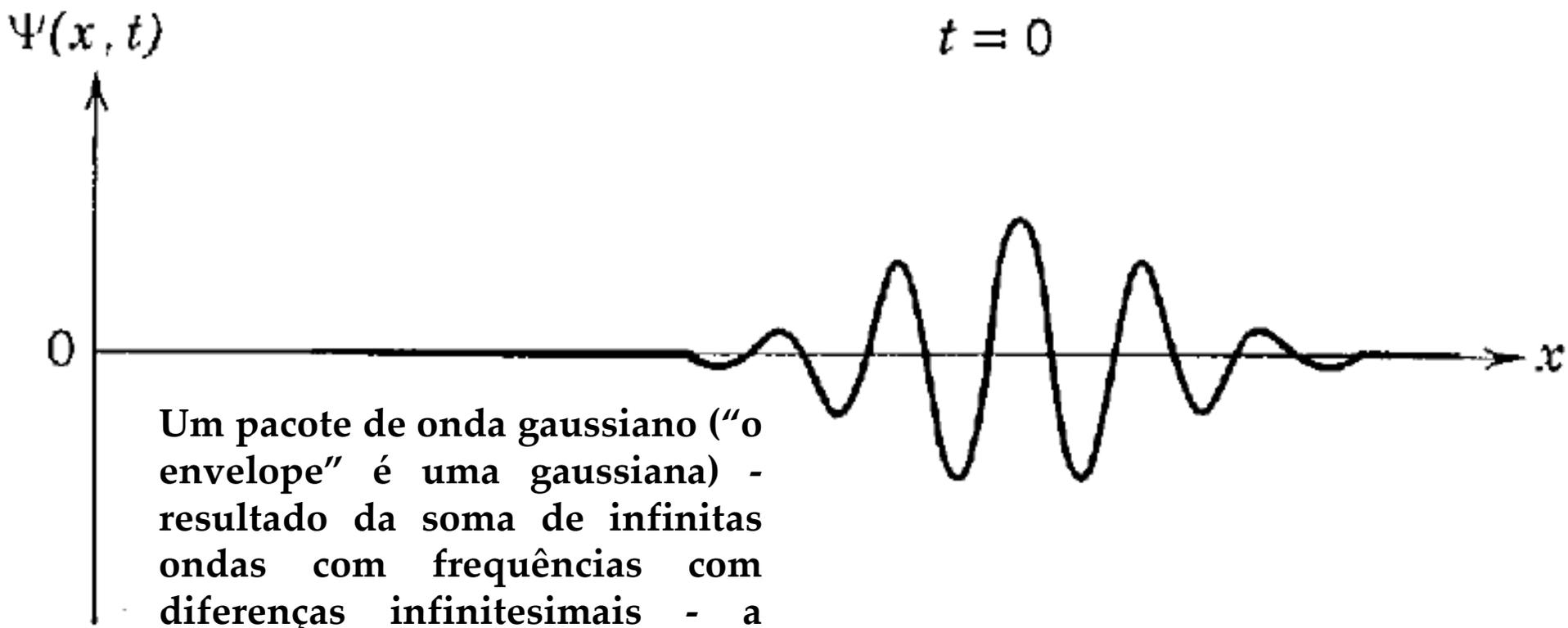
Instituto de Física USP

Física Moderna I Aula 21

Professora: Mazé Bechara

Aula 21 – O Princípio de Incerteza ou de Indeterminação de Heisenberg.

1. **O princípio de incerteza ou indeterminação: interpretação.**
2. **Consequências do princípio de indeterminação:** a impossibilidade do repouso, a existência de estados com largura natural na energia, a energia de ponto zero do MHS unidimensional (cálculo) e do átomo de H (estimativa).
3. Discussão de dúvidas.



Um pacote de onda gaussiano (“o envelope” é uma gaussiana) - resultado da soma de infinitas ondas com frequências com diferenças infinitesimais - a integral de Fourier. **Este pacote define as relações de dispersão adotadas: $\Delta x \Delta k = 1/2$ e $\Delta \omega \Delta t = 1/2$. A velocidade da onda: dw/dk**

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

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

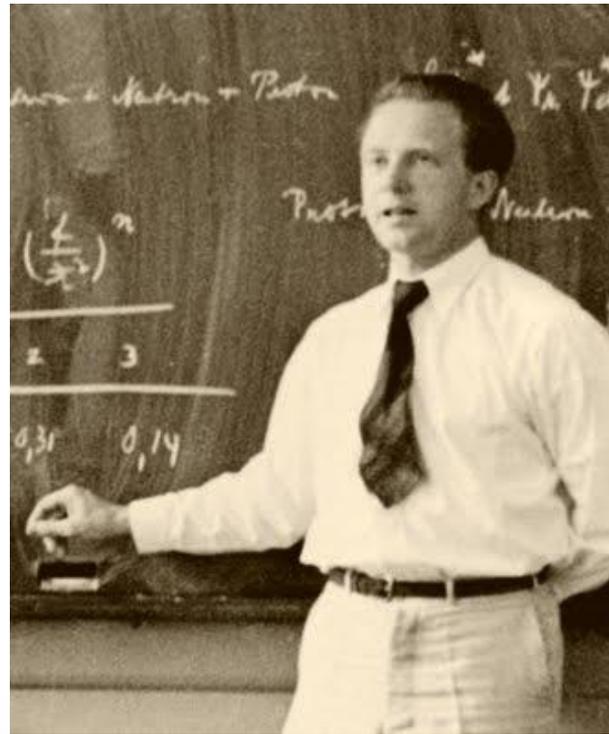
$$\Delta p_y \Delta y \geq \frac{\hbar}{2}$$

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

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

Sendo $\Delta x^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$ **Idem para todas as demais grandezas**

Werner Heisenberg – físico alemão (1901-1976) – prêmio Nobel de Física em 1932



O Princípio de Indeterminação de Heisenberg em palavras ou a interpretação da dispersão na onda da partícula material.

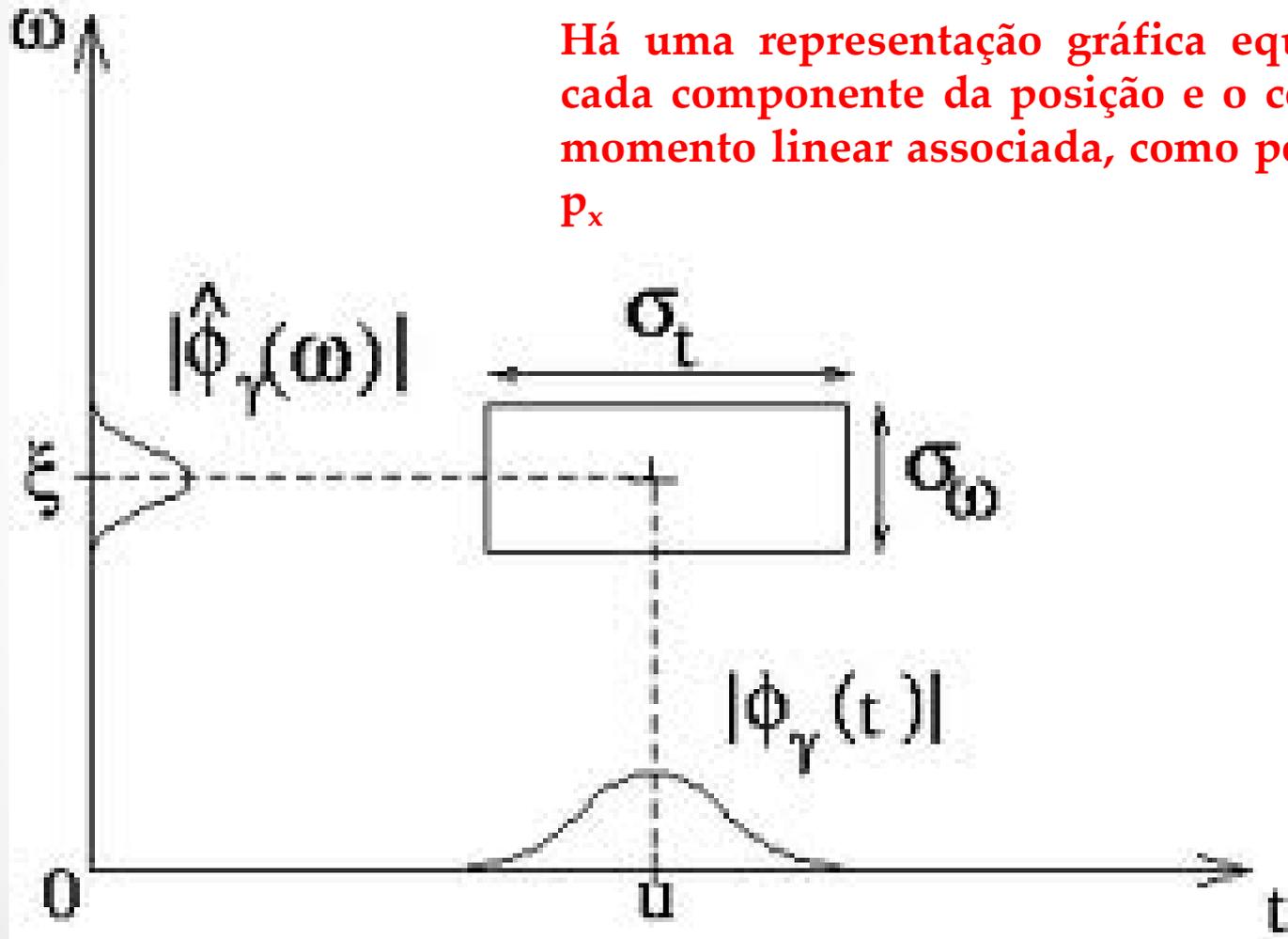
- Δx é interpretado como uma **indeterminação intrínseca da natureza física** (não do experimento) na coordenada de posição da partícula assim como Δp_x é **uma indeterminação intrínseca na componente x do momento linear.**
- Assim, a relação de dispersão da onda de partícula diz da **impossibilidade 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 em palavras ou a interpretação da dispersão na onda da partícula material.

- ΔE é interpretado como uma indeterminação intrínseca da natureza física (não do experimento) na energia do estado da partícula-onda assim como Δt 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!

Indeterminação de Heisenberg: energia e tempo (do estado quântico)

Há uma representação gráfica equivalente para cada componente da posição e o componente do momento linear associada, como por exemplo x e P_x



O Princípio De Incerteza Ou De Indeterminação De Heinsenberg.

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 Δp_x em relação aos Δy ou Δz .
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 natureza só o estado fundamental (de átomos/núcleos estáveis) tem esta duração infinita! Na teoria todos os estados estacionários obedecem $\tau \rightarrow \infty$**