Instituto de Física
USP

Física V - Aula 26

Professora: Mazé Bechara

Onde estamos, quem somos nós?

- ***Ocorreu alguma data importante à Vida da USP, recentemente?***

- ***E à Vida do Brasil?***

USP e a batalha da R. Maria Antonia, com morte do estudante secundarista José Guimarães, em 03/10/1968

FFCLUSP- Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP em 1968, após a “batalha”

Física V - Professora: Mazé Bechara

A constituição assinada em 5/10/1988 – 20 anos depois de 1968!

(Charge de Miguel Paiva, *O Estado de S. Paulo,* 5/10/88 — ed. histórica, p. 3)

A USP: 45 depois da "batalha" e 25 anos depois da constituição...

?!

A docente da USP e seus estudantes, 45 depois da "batalha" e 25 anos depois da constituição...

?!

Prêmio Nobel de Fíica 2013

- Teóricos da partícula de Higgs ganham Nobel de Física O belga François Englert, 80, e o britânico Peter Higgs, 84, ganharam o Prêmio Nobel de Física 2013, anunciou nesta terça-feira, 08 de outubro, a instituição, em Estocolmo, na Suécia.
- Ambos foram laureados pela descoberta da existência de uma partícula elementar batizada como bóson de Higgs, também conhecida como "partícula de Deus", que confere massa a outras partículas.
- A dupla, separadamente, previu a existência da partícula - fundamental para explicar porque a matéria tem massa elementar - há quase 50 anos.
- O trabalho teórico foi finalmente provado no ano passado em experiências feitas no gigantesco colisor do Laboratório Europeu de Física de Partículas (CERN).
- Higgs é professor emérito da Universidade de Edimburgo, na Escócia. Já Englert é professor emérito da Universidade Livre de Bruxelas, na Bélgica, da universidade de Tel Aviv, em Israel, e da Chapman University, nos Estados Unidos.
- Higgs, Englert e outro belga, Robert Brout, eram favoritos porque tiveram os trabalhos citados com mais frequência por outros pesquisadores. No entanto, Brout morreu em 2011 e o prêmio não pode ser concedido postumamente.

AVISOS

Já estão na página da disciplina:

1. Guia ao tópico IV;

2. Notas sobre interpretações da Mecânica Quântica.

3. N aula d quinta-feira próxima serão discutidas Aplicações do final do Tópio II e do Tópico III, como consta do programa aula a aula na página da disciplina.

O Tópico IV se inicia na última aula desta semana. Mexa-se!

Aula 26 – Procurando as ondas da partículas (!) - conceitos de ondas. A relação de dispersão e o princípio de incerteza de Heisenberg.

1. **Comprimentos de onda e frequencias de partículas materiais e de fótons – comparação de valores numéricos.**

2. **Ondas não harmônicas – sempre uma composição de ondas harmônicas (Fourier) . Batimento – fenômeno da onda composta de duas ondas monocromáticas (clássicas). As relações dispersão na onda de batimento. Outros pacotes de onda e as relações de dispersão. O pacote gaussiano ou o de menor relação de dispersão.**

3. **As relações de dispersão quando valem as relações de de Broglie – as relações de incerteza de Heisenberg. Interpretações e consequências.**

O comprimento de onda das partículas em termos das suas energias – comparação com fótons

1. Relação do comprimento de onda de partículas com velocidades não relativísticas (NR) e suas energias:

$$\lambda_{NR} = \frac{h}{p_{NR}} = \frac{hc}{\sqrt{2m_o c^2 \varepsilon_c}} = \frac{hc}{\sqrt{2\varepsilon_o \varepsilon_c}}$$

2. Comprimento de onda de partículas com velocidades relativísticas (R) e suas energias:

$$\lambda_R = \frac{h}{p_R} = \frac{hc}{\sqrt{\varepsilon^2 - \varepsilon_o^2}} = \frac{hc}{\sqrt{\varepsilon_c^2 + 2\varepsilon_o \varepsilon_c}}$$

3. O comprimento de onda do fóton e sua energia:

$$\lambda_f = \frac{h}{p_f} = \frac{hc}{\varepsilon_f}$$

O comprimento de onda de elétrons e de fótons – valores numéricos

ε_o=0,511MeV

ε_c	$\varepsilon_c^2(eV^2)$	$2\varepsilon_o\,\varepsilon_c\ (eV^2)$	λ_{NR} (A)	λ_R(A)	λ_f(A)
1eV	1	$1{,}022\times10^6$	12,3	12,3	12408
10 eV	100	$1{,}022\times10^7$	3,88	3,88	1240,8
54eV	2916	$5{,}519\times10^7$	1,67	1,67	229,7
100eV	10^4	$1{,}022\times10^8$	1,23	1,23	124,1
1KeV	10^6	$1{,}022\times10^9$	0,388	0,388	12,4

10KeV	10^8	$1{,}022\times10^{10}$	0,1227	0,1221	1,24
100KeV	10^{10}	$1{,}022\times10^{11}$	$3{,}88\times10^{-2}$	$3{,}70\times10^{-2}$	0,124
500KeV	$2{,}5\times10^{10}$	$5{,}11\times10^{11}$	$1{,}73\times10^{-2}$	$1{,}42\times10^{-2}$	$2{,}48\times10^{-2}$
1MeV	10^{12}	$1{,}022\times10^{12}$	$1{,}23\times10^{-2}$	$8{,}73\times10^{-3}$	$1{,}24\times10^{-2}$
2MeV	4×10^{12}	$2{,}044\times10^{12}$	$8{,}68\times10^{-3}$	$5{,}05\times10^{-3}$	$0{,}63\times10^{-2}$

A frequencia de partículas em movimentos não relativísticos e relativísticos – comparação com fótons

1. A frequencia da onda de partículas com velocidades não relativísticas (NR), estpa relacionada com a energia dos movimentos não relativístiacos, que é, para U=0, a energia cinética.

$$\nu_{NR} = \frac{\varepsilon_c}{h} = \frac{p^2}{h2m} = \frac{h}{2m\lambda^2} = \frac{hc}{2\varepsilon_o\lambda^2}$$

2. A frequencia da onda de partículas com velocidades relativísticas (R), está associada à energia total: cinética mais de repouso:

$$\nu_R = \frac{\varepsilon}{h} = \frac{\sqrt{p^2c^2 + \varepsilon_o^2}}{h} = \frac{1}{h}\sqrt{\frac{h^2c^2}{\lambda^2} + \varepsilon_o^2}$$

3. A frequencia do fóton:

$$\nu_f = \frac{\varepsilon_f}{h} = \frac{p_f c}{h} = \frac{hc}{\lambda}$$

Há um "salto" nas frequencias da onda da partículas NR e R!

ε_o=0,511MeV (se usar ε_o para partículas NR, todas teriam mesma ν_e

ε_c	$\nu_{eNR}(H)$	$\nu_{eR}(H)$	ν_f (H)
1eV	$2,4\times10^{14}$	$1,2\times10^{20}$	$2,4\times10^{14}$
10 eV	$2,4\times10^{15}$	$1,2\times10^{20}$	$2,4\times10^{15}$
54eV	$1,3\times10^{16}$	$1,2\times10^{20}$	$1,3\times10^{16}$
100eV	$2,4\times10^{16}$	$1,2\times10^{20}$	$2,4\times10^{16}$
1KeV	$2,4\times10^{17}$	$1,2\times10^{20}$	$2,4\times10^{17}$
10KeV	$2,4\times10^{18}$	$1,2\times10^{20}$	$2,4\times10^{18}$
------------	------------	------------	------------
100KeV	$2,4\times10^{19}$	$1,5\times10^{20}$	$2,4\times10^{19}$
500KeV	$1,2\times10^{20}$	$2,4\times10^{20}$	$1,2\times10^{20}$
1MeV	$2,4\times10^{20}$	$3,7\times10^{20}$	$2,4\times10^{20}$
2MeV	$4,8\times10^{20}$	$6,1\times10^{20}$	$4,8\times10^{20}$

Ondas não monocromáticas e periódicas, na Física Clássica

1. **A equação de toda onda é linear e na forma abaixo.**

Assim qualquer **função periódica** que **obedece a equação de onda:**

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\psi(x,t) = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi(x,t)$$

pode ser escrita como **uma série infinita de senos e cossenos (série de Fourier)**:

$$\psi(x,t) = \sum_n [a_n \cos(k_n x - w_n t) + b_n sen(k_n x - w_n t)] = \sum_n A_n e^{i(k_n x - w_n t)}$$

Ondas Clássicas - não monocromáticas e não periódicas

2. **Qualquer função que obedece a equação de onda, e sendo não periódica, obedece a integral de Fourier:**

$$\psi(x,t) = \int_0^\infty dw \int_0^\infty dk [a(k,w)\cos(k_n x - w_n t) + b(k,w) sen(k_n x - w_n t)] = \int_0^\infty dw \int_0^\infty dk A(k,w) e^{i(kx-wt)}$$

Vai daí que qualquer pode ser pensada como a soma ou a integral de ondas monocromáticas

Batimento – soma de duas monocromáticas com pequena variação de k e w

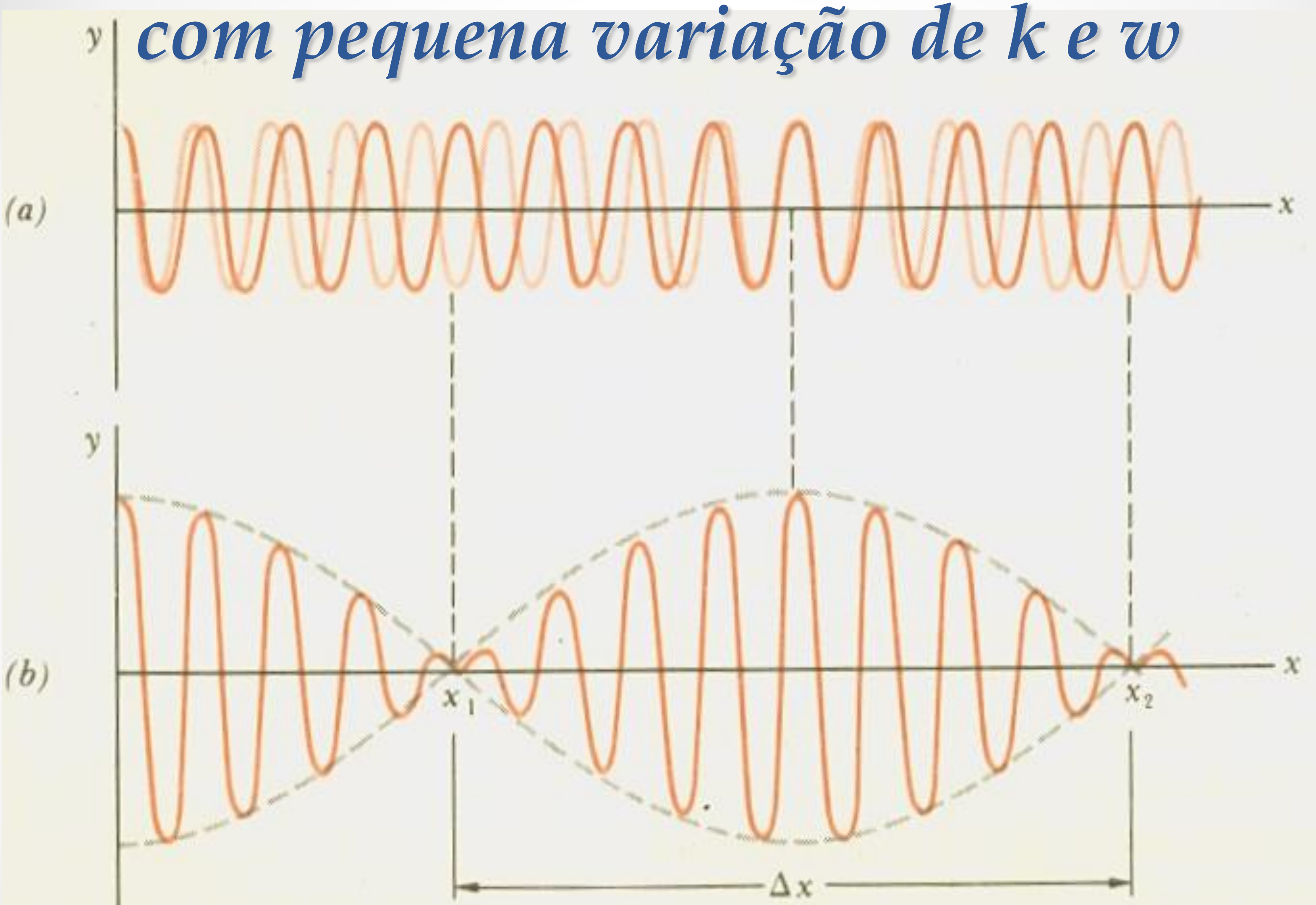
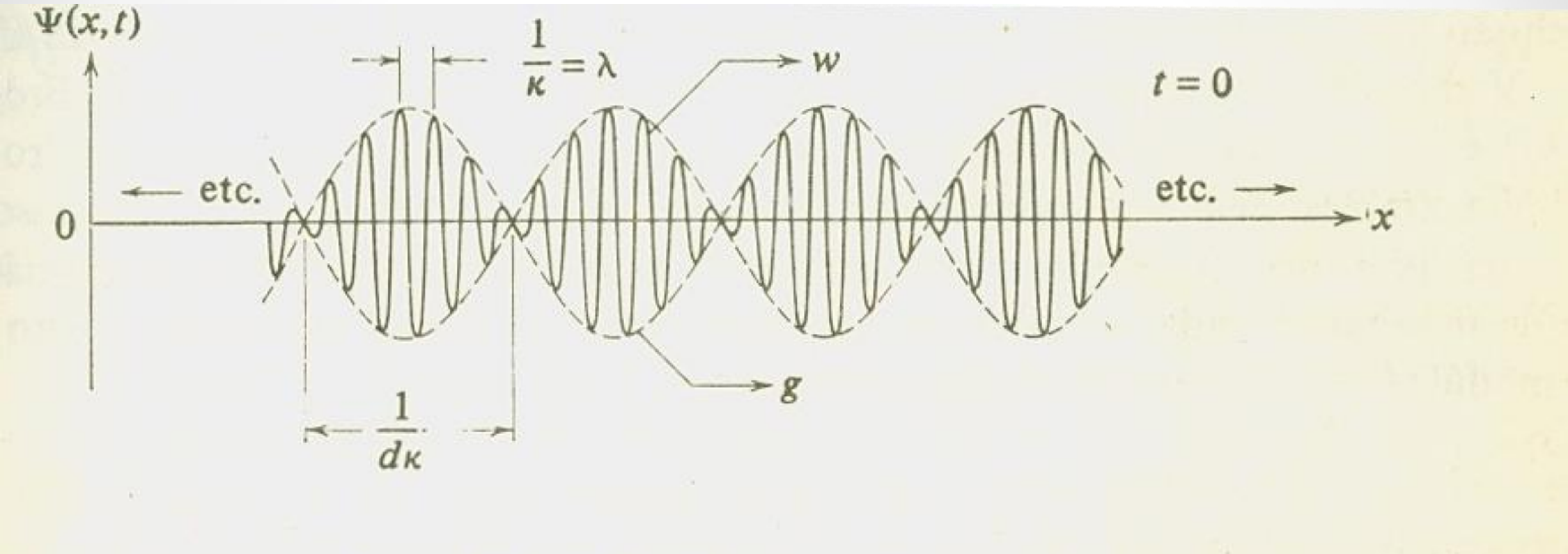


Figura (a) as duas ondas de mesma amplitude e frequencias e número de onda com diferenças infinitesimais. Figura (b): A soma das duas ondas cossenoidais na mesma região do espaço

Batimento: a velocidade de grupo, Δw/Δk, é a velocidade da onda



A soma de duas ondas senoidais de freqüências e números de onda ligeiramente diferentes.

Dedução das expressões de $\psi(x,t)$ e das relações **$\Delta x \Delta k = 2\pi$** e **$\Delta\omega\Delta t = 2\pi$ com discussão de seus significados em sala de aula**

Figura do R. Eisberg e R. Resnick

Figura do R. Eisberg e R. Resnick

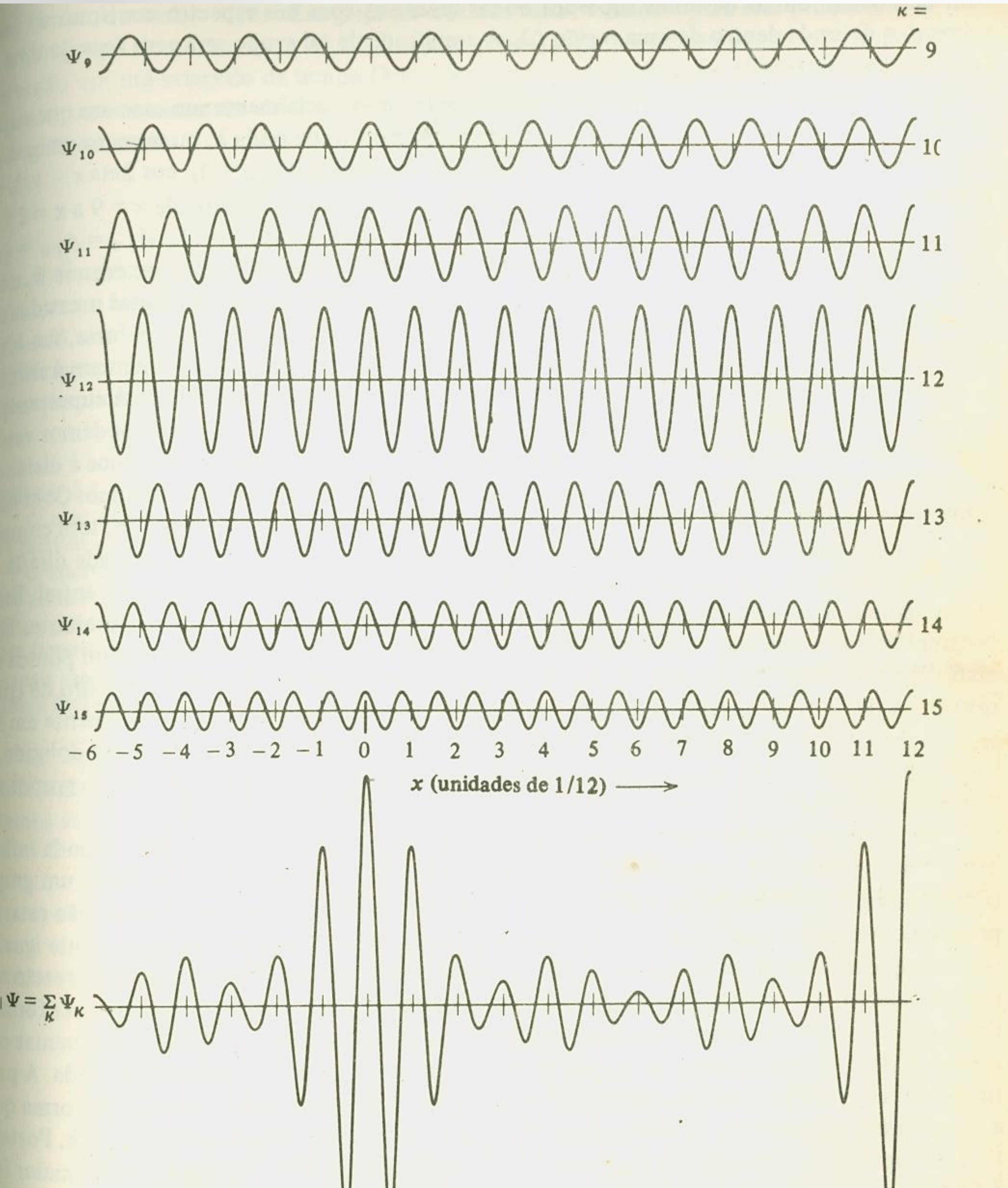


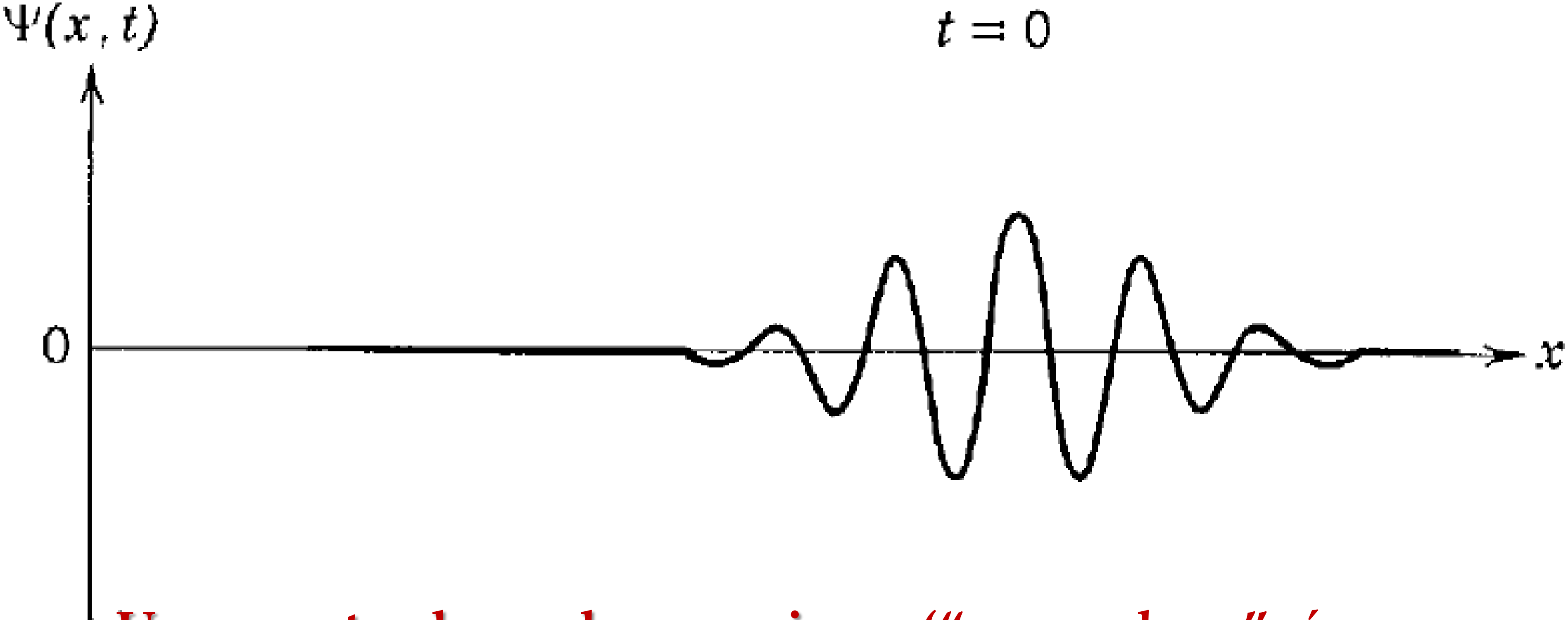
Figura do R. Eisberg e R. Resnick

⇐ Sete ondas cossenoidais de diferentes amplitudes com diferenças infinitesimais nas fequências: Δν, 2Δν, 3Δν....e

⇐ números de onda: Δk, 2Δk, 3Δk...

Observe que em relação ao batimento, combinação de apenas duas ondas de frequencias próximas, o "grupo" fica mais distante do outro. Há uma relação numérica: ΔxΔk=C e ΔωΔt=C, com C<2π.

⇐ Onda soma de todas as ondas desenhadas acima



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 mínima de qualquer pacote de onda: $\Delta x \Delta k \geq 1/2$ e $\Delta\omega\Delta t \geq ½$.

Figura do R. Eisberg, e R. Resnick

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

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

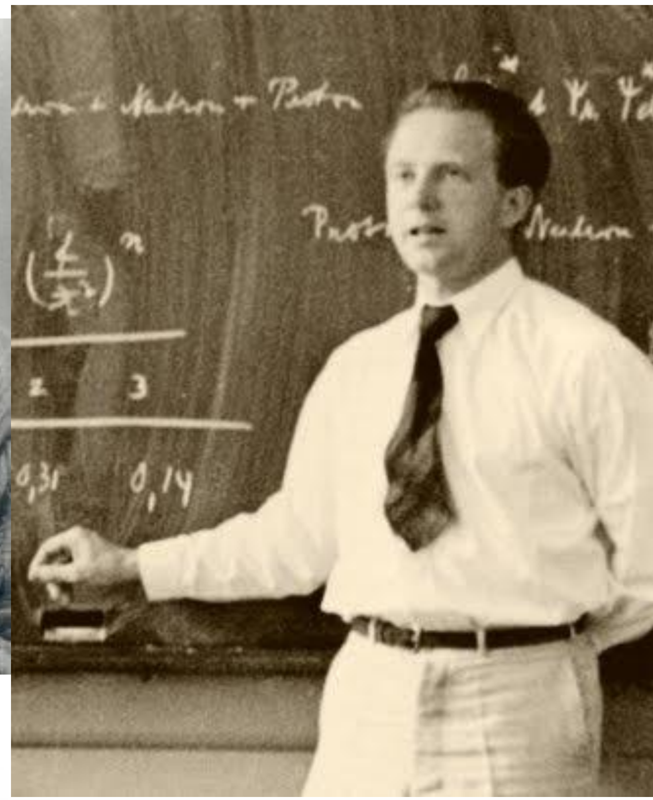
$$\Delta p_y \Delta y \geq \frac{\hbar}{2}$$

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

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

Sendo $\Delta x^2 = < x^2 > - < x >^2$

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



O princípio de indeterminação de Heinsenberg 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, 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 pudessemos fazer um experimento com indeterminação zero!**
- **Daí o nome de princípio de indeterminação ou de incerteza.**

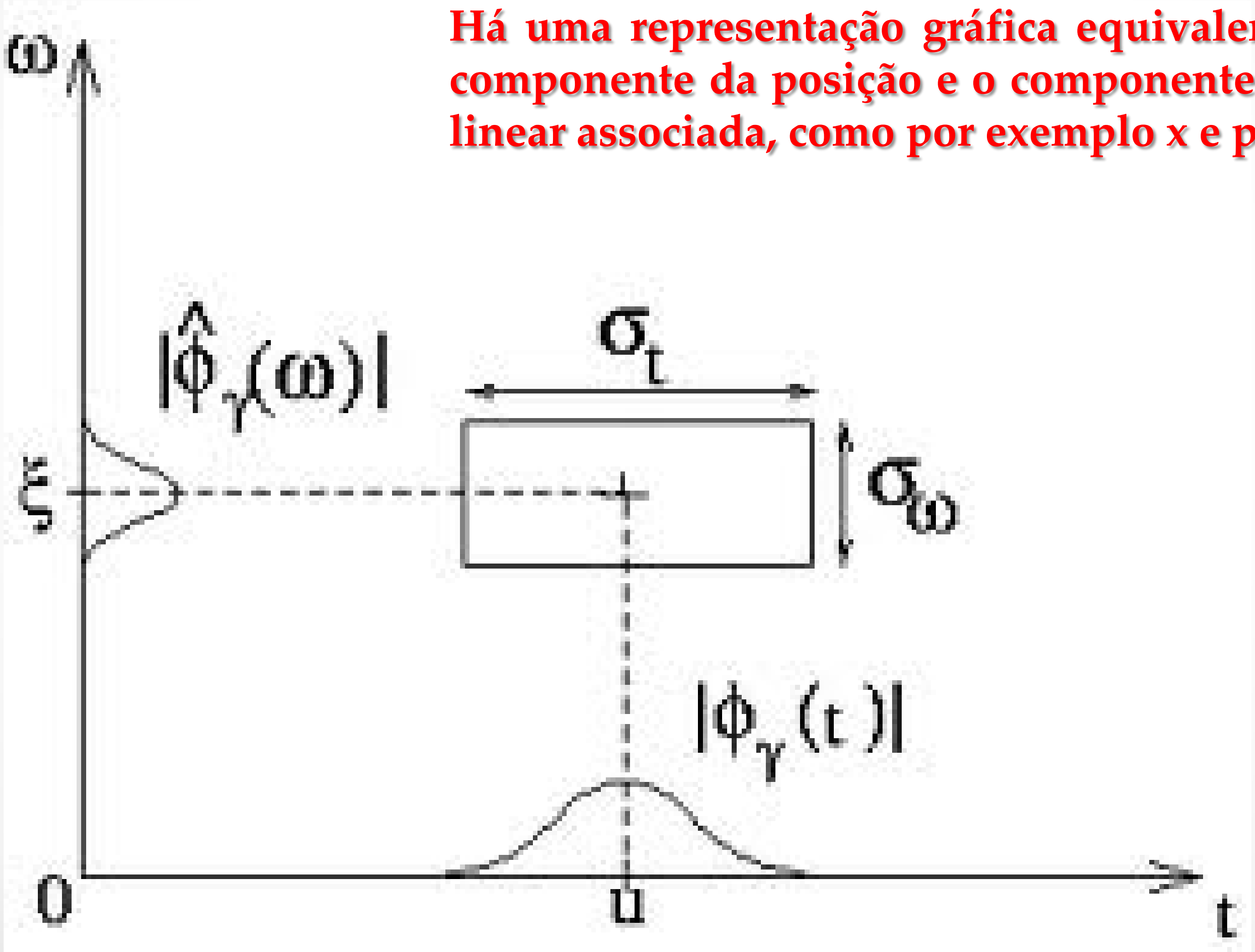
O Princípio de Indeterminação de Heinsenberg ou a interpretação da dispersão na onda da partícula material.

- **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 ΔE=0 e Δt=0, mesmo que pudéssemos fazer uma medida com incerteza experimental nula!**

Indeterminação de Heinsenberg: 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



Consequencias 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 ?**