

# Física Quântica (BCK0103-15)

aula 06 - 2019



Luciano Cruz

Sala 609 – Torre 3 – Bloco A

[luciano.cruz@ufabc.edu.br](mailto:luciano.cruz@ufabc.edu.br)

### **Na última aula (15/10/19)**

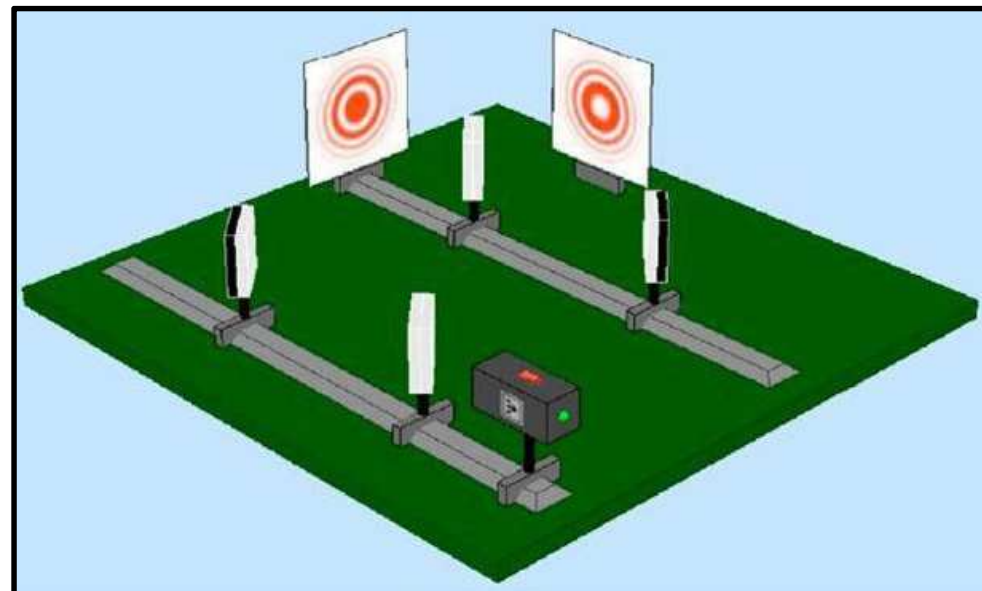
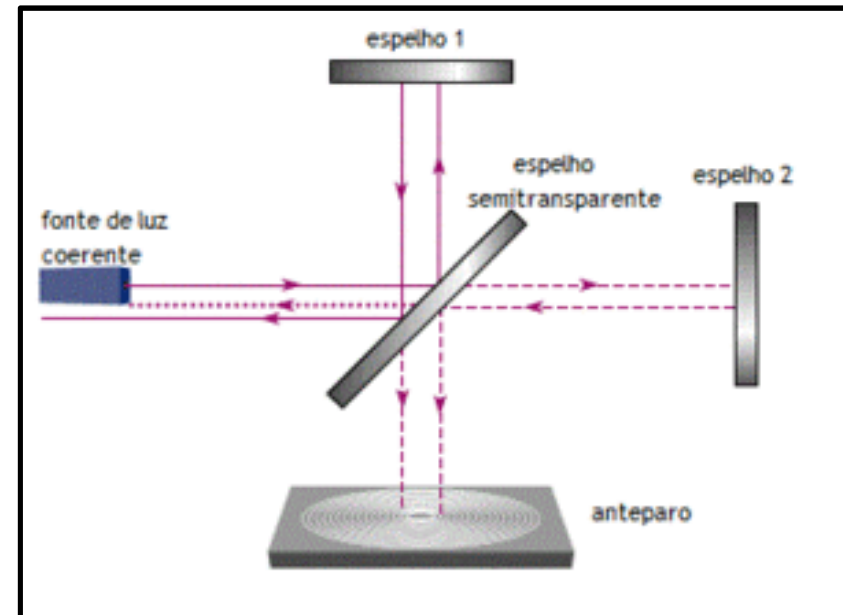
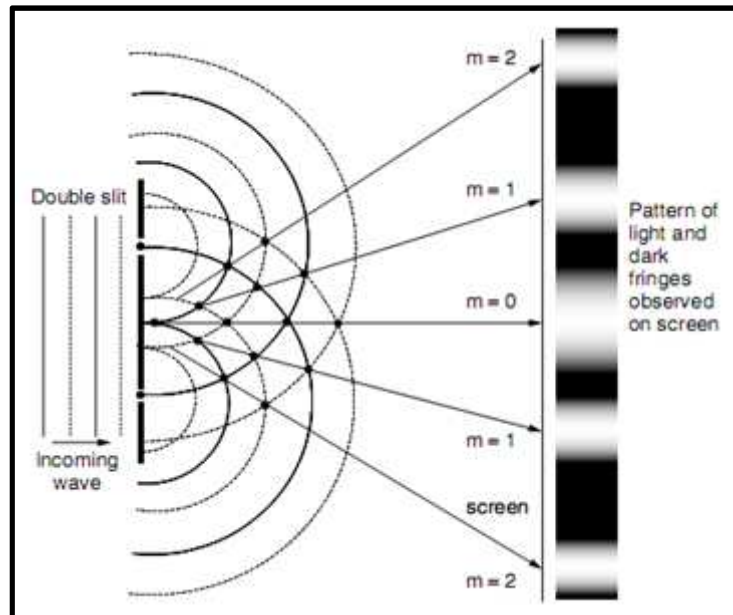
- Interferômetros e fótons únicos;
- Polarização da luz;
- Postulados da física quântica;
- Notação de Dirac.

Veja que fizemos uma inversão de conteúdo entre as aulas 6 e 7. Isso será mais salutar para os estudos na disciplina

### **Na aula de hoje (17/10/19)**

- Relação entre estados quânticos e funções de onda.
- Espaços discretos e contínuos na física quântica.
- Mecânica Quântica Ondulatória,
- Determinação eurística da Equação de Schrodinger,
- Propriedades da equação de Schrodinger e funções de ondas.

# Interferência na Física Quântica



# A Moeda Quântica



Cara



Coroa

$$|H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |T\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

dois auto-estados possíveis

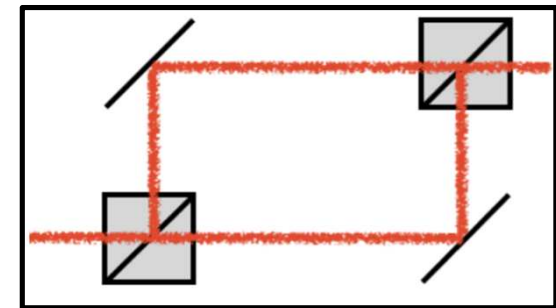
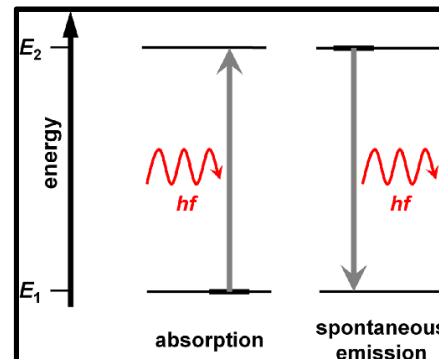
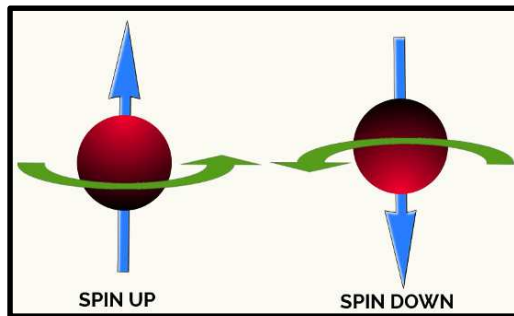
Estado de superposição com 50% de obter cara e 50% de obter coroa.

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$



*“Um objeto existe em todos os seus possíveis estados antes da medida. O ato de medir o objeto o “força” a escolher um estado.”*

Outros sistemas de dois níveis:



# Notação de Dirac

$|\Psi\rangle \longrightarrow$  “KET” (vetor coluna)

$\langle\phi| \longrightarrow$  “BRA” (vetor linha)

$\langle\phi|\Psi\rangle \longrightarrow$  “BRA(C)KET” (número)

$|\phi\rangle\langle\Psi| \longrightarrow$  “Operador” (matriz)

# Postulados

I - As propriedades de um sistema quântico são completamente definidos pelas especificação do seu vetor de estado  $|\Psi\rangle$ , que determina a representação matemática do estado físico do sistema.

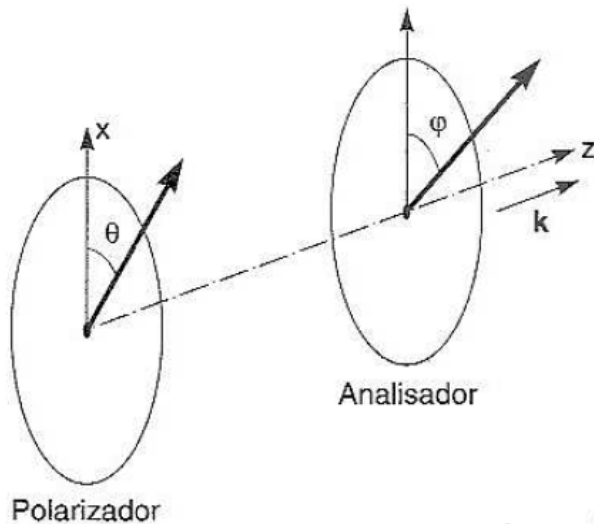
II - Se  $|\Psi\rangle$  é um vetor que representa um dado estado físico e  $|\phi\rangle$  é um outro estado, existe a probabilidade  $P(\Psi \rightarrow \phi)$  de encontrar o estado  $|\phi\rangle$  no estado  $|\Psi\rangle$ , que é dada por:  $P(\Psi \rightarrow \phi) = |\langle\phi|\Psi\rangle|^2 \leq 1$

III - Para cada propriedade física A (energia, posição, momento...), existe um “operador” associado que atua no espaço de vetores.

IV - A evolução temporal de um vetor estado  $|\Psi(t)\rangle$  de um sistema quântico é governada pela equação de evolução:  $i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = H(t) |\Psi(t)\rangle$

V - Se o sistema físico está em um estado  $|\Psi\rangle$  e realizamos uma medida do operador A, o sistema “colapsará” para um estado  $|\phi\rangle$  que está no subespaço de auto-vetores do operador A.

# Polarização da Luz



$$I / I_0 = \cos^2 (\theta - \varphi)$$

(Lei de Malus)

$$P(\varphi, \theta) = |\langle \varphi | \theta \rangle|^2$$

$$|\theta\rangle \equiv \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$$

$$\langle \varphi | \theta \rangle = (\cos \varphi \sin \varphi) \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} = \cos (\theta - \varphi)$$

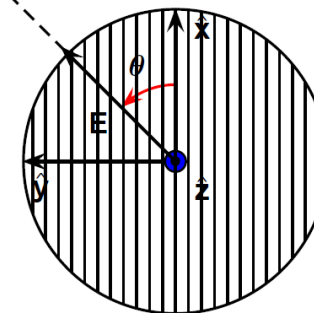
$$|\theta\rangle = \cos \theta |\hat{x}\rangle + \sin \theta |\hat{y}\rangle$$

$$|C_1|^2 = \cos^2 \theta$$

$$|C_2|^2 = \sin^2 \theta$$

$$|C_1|^2 + |C_2|^2 = 1$$

As regras da óptica clássica podem ser obtidas considerando os postulados da física quântico. Um experimento de ótica clássica pode ser considerado como um número muito grande de experimentos de um fótons simultâneos.



# O que são os observáveis na Física Quântica?

A polarização linear de um fóton numa dada direção é um observável.

Neste caso, se temos um polarizador alinhado com a Horizontal, a resposta será NÃO (0) ou SIM (1)

A energia de um fóton também é um observável.

Neste caso, o resultado é um número real  $\geq 0$ ,  $E = hf$ .

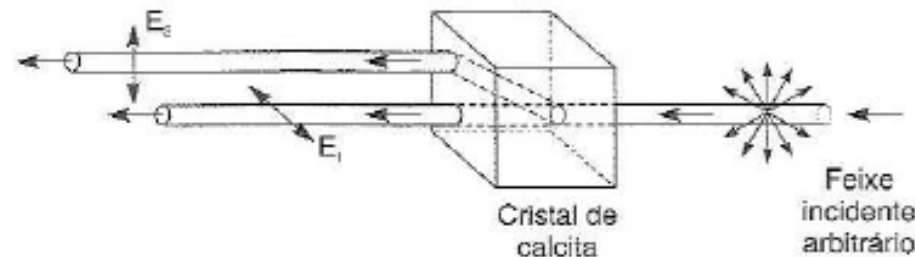
Em qualquer caso, o resultado sempre será um número real.

Assim, para os fótons, podemos escolher a direção Horizontal e a Vertical como vetores da base de medidas. Podemos ainda constatar que:

$$\langle H|H\rangle = \langle V|V\rangle = 1$$

$$\langle V|H\rangle = \langle H|V\rangle = 0$$

**Isto define uma base ORTONORMAL de dimensão 2 para os estados de polarização linear da luz**



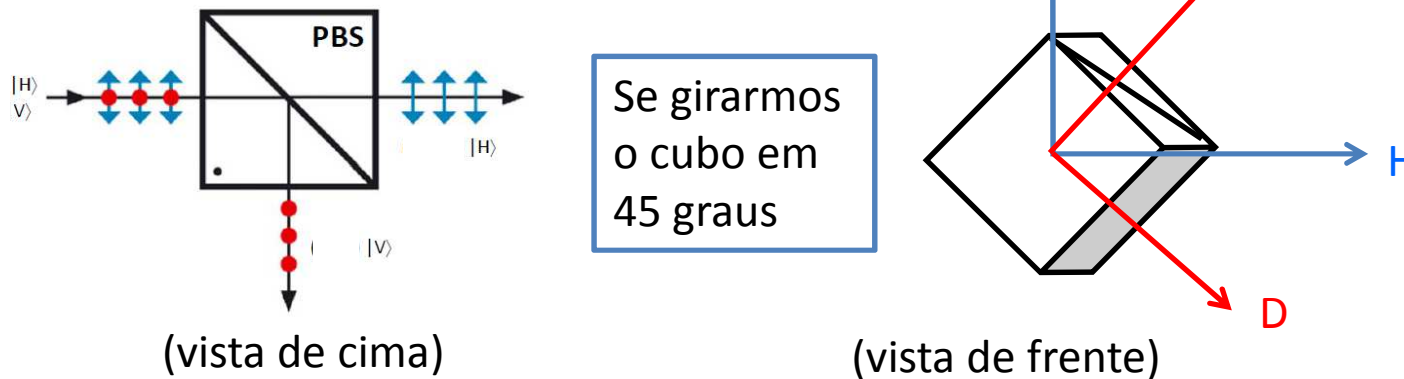


# Mudanças de bases em Física Quântica?

Vamos considerar um separador de feixe que “identifica” polarização, de modo que:

- Se a polarização é Horizontal, o fóton é transmitido.
- Se a polarização é Vertical, o fóton é refletido.

Veja que as probabilidades de reflexão ou transmissão dependem diretamente da polarização do fóton incidente.



Podemos escrever os estados de polarização agora em termos de: Diagonal (D) e Anti-diagonal (A). Você pode escrever a relação entre os vetores destas duas bases:

$$|A\rangle = \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle$$

$$|D\rangle = \gamma|H\rangle + \delta|V\rangle$$

Este resultado, ainda pode ser expresso como uma matriz, chamada de matriz de mudança de base. Determine os coeficientes indicados acima e obtenha também a operação inversão, ou seja, escrever H e V em termos de A e D.

Faça o exercício 6 da lista adicional (aula 5).

## Como definir valores médios e variâncias na Física Quântica?

Vamos considerar que realizamos diversas medidas de uma grandeza física que é representada por um operador  $\mathbf{A}$  de dimensão 2 que tem como auto estados  $|a_1\rangle$  e  $|a_2\rangle$ , com os resultados  $a_1$  e  $a_2$ , respectivamente. Como o estado  $|\Psi\rangle$  é, em geral, uma superposição de auto estados, a cada medida de  $A$ , podemos obter ou  $a_1$  ou  $a_2$ , se fizermos um número grande de medidas, podemos determinar qual o valor médio de  $\mathbf{A}$ .

$$p_1 = \frac{N_1}{N} \quad \text{Probabilidade de obter resultado } a_1 \text{ em uma medida.}$$

$$p_2 = \frac{N_2}{N} \quad \text{Probabilidade de obter resultado } a_2 \text{ em uma medida.}$$

Observe que os valores médios e variâncias não dependem da base em que foram determinados.

$$\langle A \rangle_\Psi = p_1 a_1 + p_2 a_2$$

Valor médio do operador  $A$  no para o estado  $|\Psi\rangle$

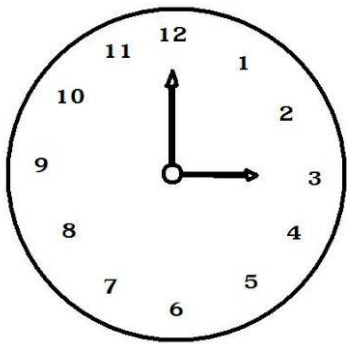
Podemos facilmente generalizar o cálculo de valor médio para sistema de dimensão  $N$ . Também é fácil mostrar que a incerteza do operador  $\mathbf{A}$  pode ser determinada por:

$$(\Delta A_\Psi) = \sqrt{\langle A^2 \rangle_\Psi - (\langle A \rangle_\Psi)^2}$$

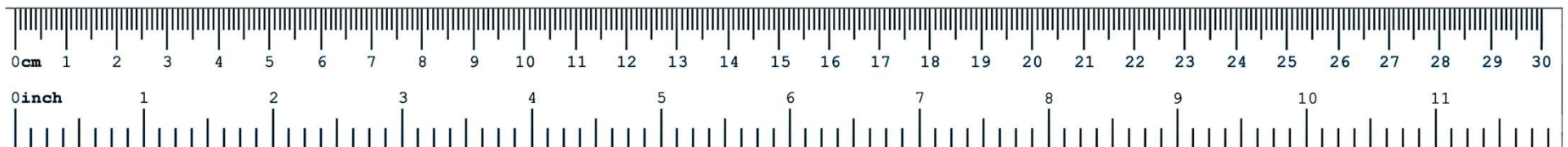
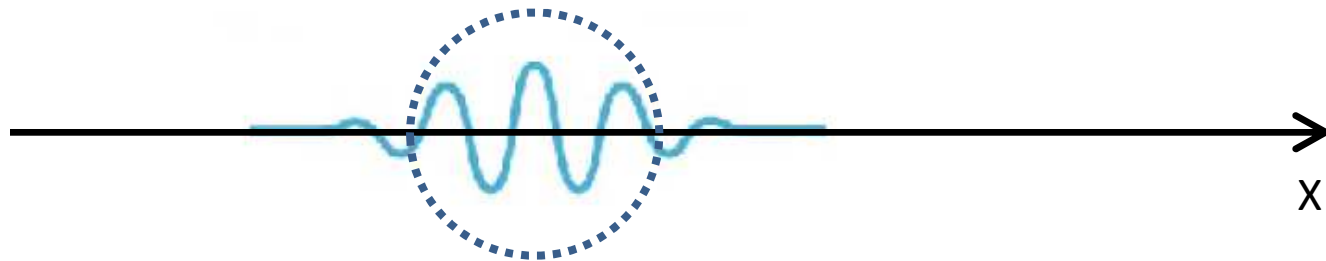
# Espaços Discretos e Contínuos em Física Quântica

Até este ponto, falamos de sistemas que podemos descrever uma medida por meio de resultados discretos, ou seja, temos apenas alguns valores possíveis para uma dada medida.

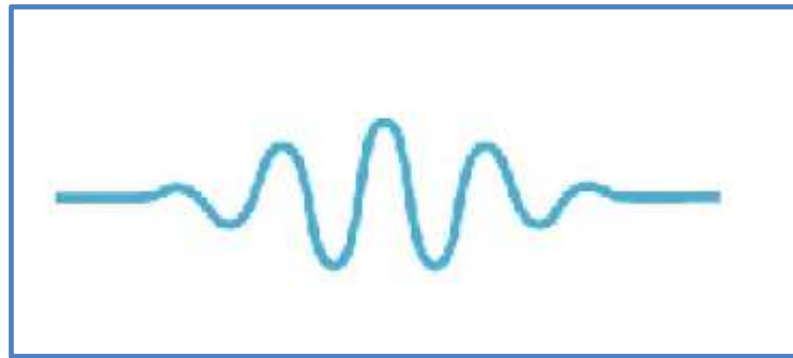
Porém, se considerarmos uma partícula se movendo livremente no espaço, devemos especificar, por meio da física quântica, qual os valores medidos de posição e momento. Neste caso, como podemos medir estes valores?



Como se mede posição e momento?



# Teoria Ondulatória da Física Quântica: A equação de onda para “entes” quânticos



(Postulado IV)

Como visto, na física quântica os entes físicos se apresentam em pacotes discretos denominados *quanta*. Por exemplo, os quanta de luz (pacotes de onda luminosa) são denominados **fótons**. Portanto, ondas podem se apresentar como partículas. Também foi verificado a simetria deste ponto com a possibilidade de partículas se comportarem como ondas. Portanto, na mecânica quântica vemos o surgimento do conceito de **Onda-Partícula** para os entes quânticos.

O comprimento de Onda e a Frequência dos “objetos quânticos” podem ser determinados por:

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad f = \frac{E}{h}$$

Aqui,  $\lambda$  é o **comprimento de onda de de Broglie**.

Obviamente, é esperado que possamos descrever a dinâmica destes objetos quânticos de modo a sermos capazes de realizar previsões sobre o comportamento destes objetos.

# Função de uma Onda

Podemos utilizar funções da “evolução” do ente físico (meio material) que oscila para descrever uma onda.

Uma onda em uma corda pode ser representada por:  $y(x, t)$

Uma onda sonora no ar pode ser representada por:  $P(x, t)$

Uma onda eletromagnética no vácuo pode ser representada por:  $E(x, t)$

Todas estas ondas, até então conhecidas, satisfaziam uma equação do tipo:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} F(x, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} F(x, t)$$

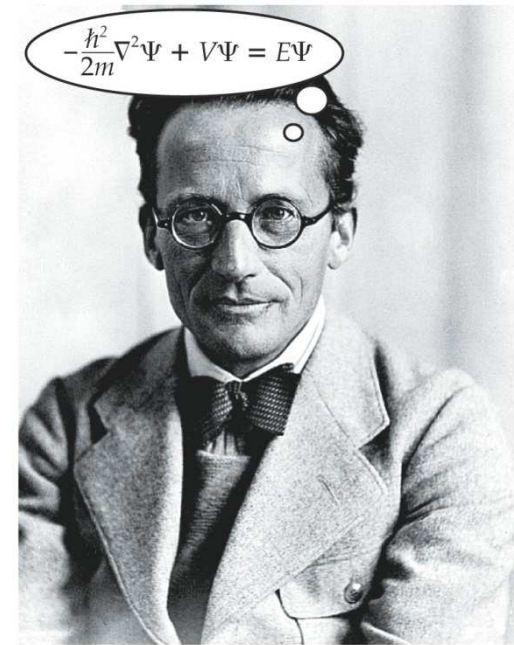
# Onda de Matéria e sua representação

Nos experimentos com elétrons, neutrons, átomos e moléculas foram observados efeitos que só podem ser descritos por uma teoria ondulatória. Portanto, esperamos que ondas de matéria também possam ser associadas a uma função de onda.

Vamos considerar que esta onda de matéria possa ser representada por uma função de onda:

$$\Psi(x, t)$$

A equação de onda para a qual as ondas de matéria são soluções foram obtidas por Shrodinger, bem como o desenvolvimento da mecânica ondulatório da teoria quântica. Este assunto será abordado com todo o detalhe necessário na segunda parte de nossa disciplina.



Erwin Schrödinger (1887-1961)

Os entes quânticos são descritos pela função de onda:

$$\Psi(x, t)$$

Esta função, que descreve o comportamento das ondas de matéria, tem uma “natureza” distinta em relação às ondas mecânicas e às eletromagnéticas.

A grandeza:  $P(x) dx = \Psi^* \Psi dx$

É denominado **observável** e o que é obtido por meio da medida. Desse modo, o módulo ao quadrado da função de onda nos dá a probabilidade de encontrar a partícula quântica na posição  $x$  no instante  $t$ .

A função de onda  $\Psi(x, t)$  possui **toda** a informação que pode ser extraída sobre a partícula quântica. (POSTULADO I)

**A extensão do pacote de onda define a região onde é mais *provável* encontrar a partícula.**





## A matemática da Física Quântica



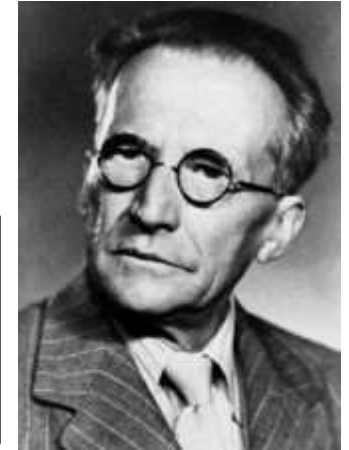
Werner Heisenberg inicialmente propôs uma teoria matemática para explicar os fenômenos quânticos baseadas apenas em grandezas físicas mensuráveis, tais como energia, posição, momento. Estas grandezas eram representadas por matrizes e os elementos diagonais dessas matrizes representavam os possíveis resultados dessas medidas.

Independentemente, Erwin Schrödinger publicou sua equação (em 1926) que governa a propagação das ondas de matéria.

Mais tarde, o próprio Schrödinger demonstrou que as duas teorias, apesar de parecerem bastante diferentes, eram totalmente equivalentes.

Nesta disciplina, já vimos um pouco sobre o formalismo de Heisenberg (aula 5), e agora iremos estudar a teoria de Schrödinger.

# A equação de Schrodinger

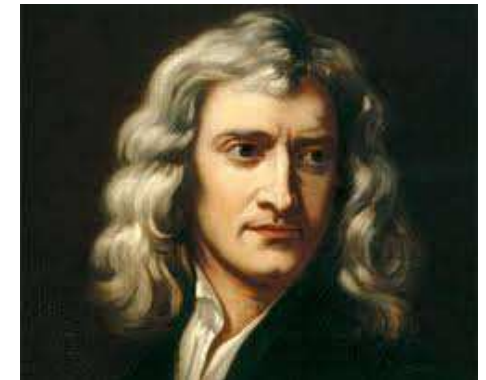


$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) + V(x, t) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t)$$

Esta é a **Equação de Schrodinger**, que dadas as condições de contorno determina a função de onda de um sistema quântico (a menos de uma fase global).

Esta equação (como a segunda lei de Newton) não pode ser deduzida de princípios fundamentais. Contudo, a sua veracidade é comprovada através de comparação de suas predições com os resultados experimentais.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \vec{p}$$



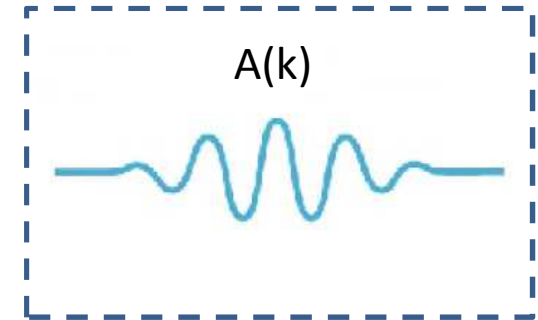
# Uma interpretação “Eurística” da equação de Schrodinger

Vamos considerar uma partícula livre unidimensional [ $V(x)=0$ ] e não-relativística dada por um pacote de onda:

$$\Psi(x, t) = \int A(k) e^{i(kx - \omega_k t)} dk$$

Onde  $\omega_k$  está associada a energia cinética da partícula:

$$E_k = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \hbar \omega_k$$



Se derivamos a função de onda duas vezes em relação a posição:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) &= \int A(k) [ik]^2 e^{i(kx - \omega_k t)} dk \\ &= - \int A(k) k^2 e^{i(kx - \omega_k t)} dk \end{aligned}$$

Se derivamos a função de onda uma vez em relação ao tempo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \int A(k) [-i \omega_k] e^{i(kx - \omega_k t)} dk$$

Observando a expressão para a energia da partícula e as derivadas acima, podemos notar que:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) = \int A(k) \frac{\hbar^2 k^2}{2m} e^{i(kx - \omega_k t)} dk$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \int A(k) \hbar \omega_k e^{i(kx - \omega_k t)} dk$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) \quad \text{Faz surgir a energia cinética da partícula}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) \quad \text{Faz surgir a energia total da partícula( que no caso da partícula livre é apenas a cinética)}$$

Em um caso geral, com um dado  $V(x, t)$  qualquer, temos:

$$\boxed{-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) + V(x, t) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t)}$$

A equação de Schrodinger satisfaz a CONSERVAÇÃO DE ENERGIA!

## Propriedades da equação de onda

**Linearidade:** Se  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  são soluções da equação de Schrodinger. Então:

$$\Psi(x, t) = c_1 \Psi_1(x, t) + c_2 \Psi_2(x, t)$$

**Realidade:** Foi apresentado previamente que a função de onda de matéria permite uma associação ao que se é medido (o observável):

$$P(x, t) = \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) \equiv |\Psi(x, t)|^2$$

**Normalização:** Uma vez que probabilidade deve ser um número no intervalo entre 0 e 1, é preciso definir que a função de onda seja normalizada, ou seja:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x, t)|^2 dx = 1$$



"The mathematical framework of quantum theory has passed countless successful tests and is now universally accepted as a consistent and accurate description of all atomic phenomena."

Erwin Schrodinaer

Mostre que, para uma partícula livre de massa  $m$  que se move em uma dimensão, a função de  $\Psi(x, t) = A \sin(kx) e^{-i\frac{E}{\hbar}t}$  é uma solução da equação de Schrodinger.

Para uma partícula livre,  $V(x)=0$ , logo temos:

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} = -k^2 \Psi(x, t)$$

$$\frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -i \frac{E}{\hbar} \Psi(x, t)$$

Substituindo na equação de Schrodinger:

$$-\frac{\hbar}{2m} [-k^2 \Psi(x, t)] = i\hbar [-i \frac{E}{\hbar} \Psi(x, t)]$$

$$\frac{(\hbar k)^2}{2m} \Psi(x, t) = E \Psi(x, t)$$

Lembrando que para partícula livre, a energia total é igual a energia cinética:

$$p = \hbar k = (2mE)^{1/2}$$

Então:

$$E \Psi(x, t) = E \Psi(x, t)$$

Faça a questão 29 e 31 da lista 1





**“Todas as qualidades do átomo da física moderna, que só podemos simbolizar mediante uma equação de derivadas parciais em um espaço abstrato multidimensional são inferidas; não se pode atribuir diretamente propriedade material alguma ao átomo. Assim, qualquer representação que nossa imaginação possa criar é intrinsecamente deficiente; a compreensão do mundo atômico de um modo primário e sensorial... é impossível. “**

**W. Heisenberg**



## A equação de Schrodinger independente do tempo

Vamos considerar uma situação física em que o potencial não depende do tempo, ou seja:

$$V = V(x)$$

Neste caso, a função de onda pode ser apresentada como um produto de uma função que depende apenas da variável  $x$  por outra função que só depende da variável  $t$ . Esta técnica costuma ser denominada de **separação de variáveis**.

$$\Psi(x, t) = \psi(x) \phi(t)$$

Substituindo a solução dada acima na equação de Schrodinger:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) + V(x) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\phi(t)\frac{\partial^2}{\partial x^2}\psi(x) + V(x)\psi(x)\phi(t) = i\hbar\psi(x)\frac{\partial}{\partial t}\phi(t)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{1}{\psi(x)}\frac{d^2}{dx^2}\psi(x) + V(x) = i\hbar\frac{1}{\phi(t)}\frac{d}{dt}\phi(t)$$

Observe que do lado direito temos uma função que só depende de x e do lado esquerdo uma função que só depende de t. Portanto, podemos escrever que:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{1}{\psi(x)}\frac{d^2}{dx^2}\psi(x) + V(x) = E$$

$$\frac{i\hbar}{\phi(t)}\frac{d}{dt}\phi(t) = E$$

Onde E é uma constante com unidades de energia.

A solução para a equação de  $\phi(x)$  pode ser calculada como:

$$i\hbar \frac{d}{dt} \phi(t) = E \phi(t)$$

$$\phi(t) = e^{-i\frac{E}{\hbar}t}$$

De fato,  $E$  corresponde a energia da partícula. No caso de uma partícula livre,  $V(x)=0$ , podemos verificar diretamente que esta é a solução. Vamos considerar uma partícula com um momento dado por uma faixa estreita em torno de  $k_0$ .

$$\begin{aligned} A(k) &\approx A = \text{cte.} \quad \text{para } k = k_0 \\ &= 0 \quad \text{para } k \neq k_0 \end{aligned}$$

A equação de Schrodinger para a partícula livre é dada por:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t)$$

E a solução é dada por:

$$\Psi(x, t) \sim e^{ikx - i\omega t} \quad \text{Lembrando que: } \frac{E}{\hbar} = \omega$$

Portanto, para um sistema em que o potencial não depende do tempo. Podemos simplificar a equação de Schrodinger:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + V(x) \psi(x) = E \psi(x)$$

E a solução geral da Equação será dada por:

$$\Psi(x, t) = \psi(x) e^{-i \frac{E}{\hbar} t}$$

A distribuição de probabilidade pode ser então calculada diretamente como:

$$P(x) = \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) = \psi^*(x) \psi(x)$$

Mostre que, para uma partícula livre de massa  $m$  que se move em uma dimensão, a função de  $\Psi(x,t) = A \sin kx + B \cos kx$  é uma solução da equação de Schrodinger independente do tempo para qualquer valor de  $A$  e  $B$ .

Para uma partícula livre,  $V(x)=0$  e, portanto, a energia total é a energia cinética, ou seja,  $p = \hbar k = (2mE)^{1/2}$  Derivando a função de onda:

$$\frac{d\Psi}{dx} = kA \cos kx - kB \sin kx$$

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -k^2 A \sin kx - k^2 B \cos kx$$

$$= -k^2(A \sin kx + B \cos kx) = -k^2\Psi(x)$$

Substituindo na equação de Schrodinger:

$$\frac{-\hbar^2}{2m} [(-k^2)(A \sin kx + B \cos kx)] = E(A \sin kx + B \cos kx)$$

$$\frac{\hbar^2 k^2}{2m} \Psi(x) = E \Psi(x)$$

Lembrando que:  $\hbar^2 k^2 = 2mE$  Temos:  $E \Psi(x) = E \Psi(x)$

# A questão do tempo na Mecânica Quântica

Diferentemente, da Relatividade onde o tempo surge como uma quarta dimensão a ser considerada e toda descrição deve ser realizada em um sistema quadrimensional  $(x,y,z,t)$ . Na física quântica, o tempo tem um papel muito similar ao apresentado na física clássica. Porém, sem aprofundamentos filosóficos sobre “tempo absoluto”.

No caso da mecânica quântica, o tempo surge apenas como um parâmetro da equação de Schrodinger. De fato, veremos futuramente que a dinâmica descrita pela física quântica é totalmente reversível, salvo quando adicionemos outros termos extras para evitar isto.



## Resolvendo a equação de Schrodinger para potenciais específicos

Para a solução da parte dependente da posição da equação de Schrodinger é preciso definir a forma do potencial  $V(x)$ .

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + V(x) \psi(x) = E \psi(x)$$

Dessa forma, a **definição do potencial  $V(x)$  que determinará qual é a solução da equação de Schrodinger.**

**Na segunda parte da disciplina, discutiremos diversos potenciais diferentes e suas consequências.**

Uma vez que já vimos a equação que descreve os entes quântico, ainda podemos nos questionar:

**Qual o significado real dos estados quânticos?**



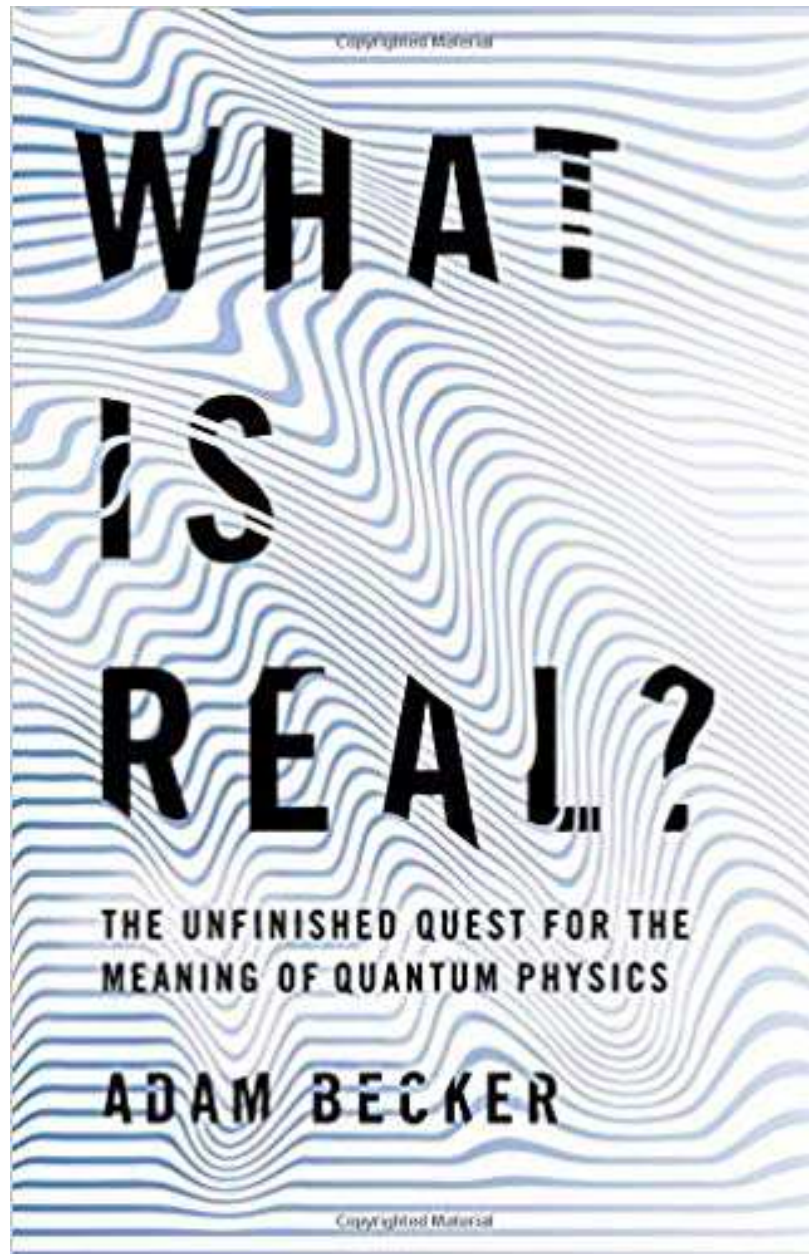
# O que o estado quântico realmente significa?

[ ] Para uns, o estado quântico (em si) é uma propriedade do sistema.

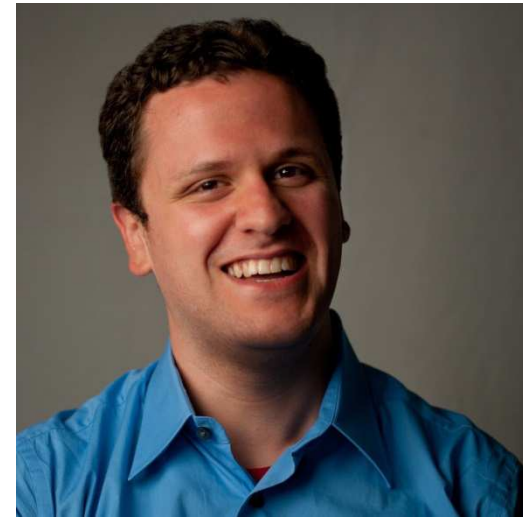
[ ] Para alguns, o estado quântico é apenas uma expressão do nosso conhecimento sobre o sistema.

[ ] Para outros ainda, nós não deveríamos deixar de lado a questão se o estado quântico se refere ao mundo real ou não.

**A resposta desta pergunta é realmente importante?**



(Livro publicado em 2018)



Adam Becker  
(1984 - )

**“O problema da Física Quântica e porque  
isso realmente importa.”**

(Adam Becker - palestra em Harvard)

<https://youtu.be/X1QgTxxZsRM>

O que é real?

# Bem vindo a Matrix

<https://www.youtube.com/watch?v=VVro5wxqh4U>

# Interpretações em Mecânica Quântica

Com a física quântica, os nossos conceitos, princípios e intuições mais básicos relacionados à natureza tiveram que ser revistos ou mesmo abandonados. Dessa forma, a descrição matemática da física quântica foi bem estabelecida, porém a interpretação dos resultados obtidos sempre foi um tema controverso. Em geral, nos livros textos de física quântica, a interpretação de Copenhaguen é a apresentada. Contudo, ela não é a única, outras interpretações surgiram e ainda são tema de ampla discussão.

# Por que temos tantas interpretações diferentes para a física quântica?

- ☐ Interpretação de Copenhagen
- ☐ Bayesianismo Quântico
- ☐ Lógica Quântica
- ☐ Teorias Objetivas de Colapso
- ☐ Interpretação de de Broglie-Bohm
- ☐ Interpretação de Muitos Mundos (Multiversos)
- ☐ Mecânica Quântica Relacional

Na próxima aula, veremos alguns resultados inusitados da física quântica. Também algumas das interpretações que surgiram ao longo do desenvolvimento da física quântica e discutir suas possíveis implicações.

Também “amarraremos” as pontas soltas que sobraram.

**O professor diz que vai explicar sobre gato de Schrodinger e multiversos na próxima aula.**



**Eu esperando ele falar sobre as proposições Deutsch e fitas invertidas de Möbius para explicar a viagem no tempo do filme dos Vingadores:Ultimato.**



### **Na aula de hoje (17/10/19)**

- Relação entre estados quânticos e funções de onda.
- Espaços discretos e contínuos na física quântica.
- Mecânica Quântica Ondulatória,
- Determinação eurística da Equação de Schrodinger,
- Propriedades da equação de Schrodinger e funções de ondas.

### **Na próxima aula (22/10/17)**

- Estados quânticos “especiais”: Gato de Schrodinger e Emaranhados.
- Interpretações em Física Quântica.
- “Amarrando pontas soltas” (parte 1)



Perguntas, dúvidas, comentários, aflições?

## Cronograma e conteúdo programático da disciplina (parte 1)

Semana	Dia	Aula	Conteúdo
1	<del>24/09 (Ter)</del>	<del>1</del>	<del>Apresentação a disciplina; Evidências experimentais da teoria quântica : radiação do Corpo Negro.</del>
	<del>---</del>	<del>---</del>	<del>-----</del>
2	<del>01/10 (Ter)</del>	<del>2</del>	<del>Evidências experimentais da teoria quântica: efeito foto-elétrico, efeito Compton, espectros atômicos</del>
	<del>03/10 (Qui)</del>	<del>3</del>	<del>Modelos atômicos, Modelo quântico de Bohr, Experimento de Franck-Hertz, Hipótese de de Broglie e ondas de matéria.</del>
3	<del>08/10 (Ter)</del>	<del>4</del>	<del>Revisitando ondas; interferência (fótons e elétrons) e interferômetros; dualidade onda-partícula e princípio de complementaridade; Princípio de incerteza de Heisenberg.</del>
	<del>---</del>	<del>---</del>	<del>-----</del>
4	<del>15/10 (Ter)</del>	<del>5</del>	<del>Interferômetros e fótons únicos, polarização da luz, postulados da física quântica e notação de Dirac</del>
	<del>17/10 (Qui)</del>	<del>6</del>	<del>Relação entre estados quânticos e funções de onda. Espaços discretos e contínuos na física quântica. Mecânica Quântica Ondulatória, Determinação eurística da Equação de Schrodinger, propriedades da equação de Schrodinger e funções de ondas.</del>
5	22/10 (Ter)	7	Estados quânticos “especiais”: Gato de Schrodinger e Emaranhados. Interpretações em Física Quântica. “Amarrando pontas soltas” (parte 1)
	---	---	-----
6	<b>29/10 (Ter)</b>	<b>P1</b>	<b>Primeira Avaliação</b>
	31/10 (Qui)	8	Potenciais simples: poço de potencial, Espaço de estados e transições entre estados de energia; Elétrons em currais quânticos

## Cronograma e conteúdo programático da disciplina (parte 2)

Semana	Dia	Aula	Conteúdo
7	05/11 (Ter)	9	Potenciais simples: poço quadrado finito; operadores e valores médios de observáveis, pontos quânticos e suas aplicações.
	---	---	-----
8	12/11 (Ter)	10	Potenciais simples: Oscilador Harmônico Quântico. Armadilhas de íons e princípios de informação quântica. Requisitos essenciais de um computador quântico,
	14/11 (Qui)	11	Potenciais simples: potenciais degraus, reflexão, Transmissão de Ondas, Tunelamento. Tempo de tunelamento em uma barreira (revisitando o princípio de incerteza de Heisenberg). Microscópios de tunelamento e mapeamento de átomos e moléculas.
9	19/11 (Ter)	12	Equação de Schrodinger em três dimensões: O cubo quântico (coordenadas cartesianas), O átomo de Hidrogênio (coordenadas esféricas), Separação de variáveis e a quantização de Momento Angular e Energia.
	---	---	-----
10	26/11 (Ter)	13	Funções de ondas do átomo de Hidrogênio; Orbitais; Significado físico dos números quânticos atômicos. Imagens, Abstrações e Interpretações.
	28/11(Qui)	14	Introdução (noções gerais) aos Átomos de muitos elétrons, spin (quarto número quântico atômico) e tabela periódica. O fim de um começo.
11	<b>03/12 (Ter)</b>	<b>P2</b>	<b>Segunda Avaliação da Disciplina</b>
	---	---	-----
12	<b>10/12 (Ter)</b>	<b>Psub\REC</b>	<b>Avaliação Substitutiva ou Avaliação de Recuperação</b>
13			
	<b>14 a 21/9</b>		<b>Lançamento de conceitos e faltas</b>