

Apêndice A

O Produto e seu guia

Caro Colega Professor,

Esse produto educacional foi elaborado para ser aplicado a turmas do segundo ou terceiro ano do ensino médio. Trata-se de um conjunto de 4 aulas (uma por semana) cujo o conteúdo programático se relaciona à Física Ondulatória, fenômenos de interferência, difração e batimento. Este último ponto é apresentado como um exemplo prático em sala de aula da relação de indeterminação (princípio de incerteza). Tal extensão é, portanto, abordada de maneira natural. Os objetos de cena didática são os seguintes: (i) os laboratórios virtuais (simuladores) *phet* descritos abaixo; (ii) o aplicativo (gratuito) para celular chamado *phyphox*; e (iii) materiais de uso caseiro.

Este encarte também serve como guia para o uso de tais ferramentas. Ademais, apresentamos também aqui perguntas-teste (e sugestão de respostas) relacionadas ao conteúdo de cada aula. Estas perguntas podem, a critério do Colega, conformar avaliações a serem aplicadas no final de cada aula. Ressaltamos, porém, que toda a fundamentação teórica, referências e método pedagógico seguido estão descritos no texto da dissertação, sendo recomendável sua leitura.

Abaixo, portanto, descrevemos a sequência didática com as aulas e os devidos guias para o uso dos objetos de cada cena didática.

Bom Trabalho,
Derek Gava

Aula 1. Ondas: Um movimento periódico

Conteúdo: Definição e classificação de onda uni-dimensional (1D) e seus elementos.

Objetivo: Discutir o conceito de ondas classificando seus distintos elementos *pertinentes à presente sequência didática.*

Metodologia: Uso de laboratório virtual (simulador *phet*) como ferramenta de ensino didática. O método da aula baseia-se nos 3 momentos pedagógicos, tendo o simulador como laboratório virtual.

Estratégia Didática

- **Momento 1 (20 min)** - O propósito deste primeiro momento é a problematização ao demonstrar oscilações ondulatórias e periódicas. Simularemos uma corda com uma extremidade presa no infinito, de maneira que ondas unidimensionais sobre a corda sejam visualizadas. Para tal, use o simulador <https://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-on-a-string> A problematização se dá nas seguintes indagações iniciais: (i) qual a velocidade da onda; (ii) qual o comprimento da onda; (iii) qual a frequência da onda e (iv) o que vc entende por energia da onda. O foco está nas definições de *amplitude, frequência, comprimento e velocidade da onda*, cuja explicação será dada no próximo momento. Problematiza-se ainda o conceito de energia da onda ao indagar se o Professor perde ou não calor ao produzir, girando a manivela presa à extremidade esquerda da corda, esta onda uni-dimensional (1D). O conceito de energia terá seus seguintes momentos pedagógicos em sala da aula 4 desta sequência.
- **Momento 2 (15 min)** – Este é o momento para a explicação teórica das oscilações escrevendo na lousa as unidades de cada elemento da onda, de maneira que o significado de cada quantidade física envolvida seja facilmente explorada. Assim, a fórmula que envolve frequência, f , comprimento, λ , e velocidade da onda $v = f\lambda$ pode ser trazida à lousa. Especial nota é dada ao fato de se tratar de movimentos periódicos. Cuidado deve ser dado à escolha apropriada dos parâmetros da simulação de maneira a que tenhamos um caso mais próximo da situação ideal. Nesse momento o professor pode elaborar sobre as ondas sonoras provindas da corda e explicar sua propagação através do ar, mostrando que a frequência dessas ondas sonoras são as da própria oscilação unidimensional ora visualizada.
- **Momento 3 (10 min)** - Neste momento o professor estimulará os estudantes a buscarem, em seu dia-a-dia, outras manifestações físicas descritas por movimentos periódicos e se é possível haver ondas bi-dimensionais e tri-dimensionais.

<u>Recursos didáticos:</u> exposição teórica com giz e lousa; computador com ligação de rede internet e projetor. Laboratório virtual, corda e mola.
<u>Tópicos importantes:</u> velocidade, comprimento e frequência de uma onda unidimensional.
<u>Tempo:</u> 45 minutos

Guia de uso das ferramentas da cena didática - Aula 1

O simulador usado deve ser acessado no sítio https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string. Neste mesmo site, há material introdutório de uso do simulador. Há também informação sobre requisitos básicos para que o simulador funcione no seu computador. Em geral, o programa é bastante amigável e funciona com requisitos mínimos de *software e hardware* instalados. Na maioria dos computadores com os quais trabalhamos, não é preciso baixar o programa. Basta rodá-lo no próprio navegador, ou seja, apertar no ícone *play* >.

A página inicial deve ser igual à Figura 1, onde uma oscilação de Amplitude e Frequência fixos é produzida em uma corda com uma de suas extremidades presas no infinito. O cronômetro marca o tempo em segundos que a manivela presa à extremidade esquerda da corda completa uma volta completa. O Professor fica convidado a ligar e desligar o cronômetro do simulador sempre quando a bolinha verde da extremidade esquerda atingir o mínimo e o máximo da amplitude, respectivamente. Este será o intervalo de tempo cujo o inverso dá o valor da frequência de onda viajante unidimensional (1D). O parâmetros do simulador podem ser mudados facilmente, mas essa é a tela de principal interesse da aula. Os alunos deverão se sentir livres para variar os parâmetros do simulador de maneira a torná-lo familiar. A bolinha vermelha sobre a linha de referência, viajará para a direita a uma velocidade de aproximadamente 4 cm/s, $v = \lambda.f$

Outro elemento de cena é uma corda, cuja a foto pode ser vista na Figura 2. Ao vibrá-la, o Professor deverá tirar som da mesma, elaborando desta forma sobre a natureza ondulatória do som e como este se propaga. Trata-se aqui de subsídio para um eventual terceiro momento pedagógico desta Aula 1 ao inter-relacionar os diferentes modos de ondulações e seus efeitos.

Note que a onda é produzida ao girar a manivela presa à (bolinha verde da) extremidade esquerda da corda.

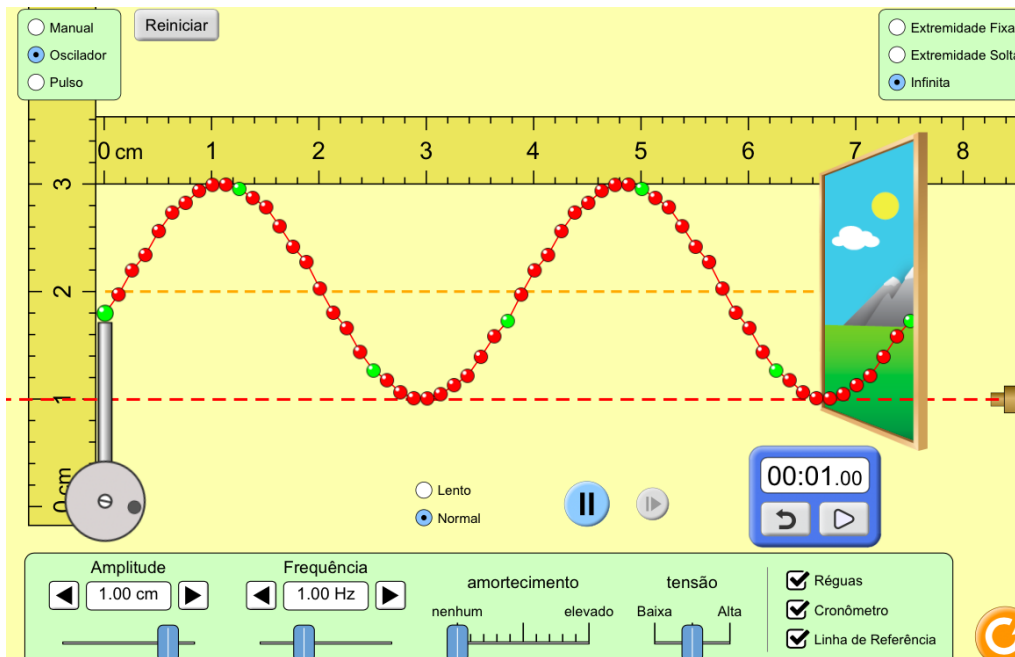


Fig.1 Impressão de tela do simulador *wave-on-a-string* que gerou uma onda de Amplitude de 1,0 [cm] e frequência de $f = 1,00$ [Hertz] em uma corda com uma de suas extremidades presa no infinito. Os parâmetros adotados são os descritos no texto acima.



Fig.2 Corda de 2,5 m de comprimento cujas as extremidades podem ser presas na mesa ou carteira de sala aula, de maneira que uma função periódica (senoidal) seja visualizada pela classe.

Perguntas-teste e Proposição de Respostas - AULA 1

(1) **Pergunta:** O que é onda?

Resposta: Perturbação que propaga energia sem propagar matéria.

(2) **Pergunta:** Cite uma diferença entre ondas mecânicas e eletromagnéticas.

Resposta: Ondas mecânicas precisam de meio material para se propagar e ondas eletromagnéticas não precisam de meio material para se propagar.

(3) **Pergunta:** Quais são as grandezas que caracterizam as ondas? Defina-as.

Resposta: Período: tempo para ocorrer uma oscilação completa.

Frequência: razão entre o número de oscilações pelo correspondente intervalo de tempo.

Comprimento de onda: distância percorrida pela onda ao realizar uma oscilação completa.

Amplitude: distância de uma crista ou de um vale até o nível de equilíbrio.

Velocidade: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$

Aula 2: Efeitos Ondulatórios I

Conteúdo: Ondas mecânicas, eletromagnéticas e interferência entre ondas

Objetivo: Classificação de ondas e fenômenos ondulatórios *pertinentes à presente sequência didática.*

Metodologia: Uso de simulador presente no sítio *www.phet.colorado.edu*. O método de aula baseia-se nos 3 momentos pedagógicos, explorando o laboratório virtual da simulação.

Estratégica Didática

- **Momento 1 (20 min)** - A exemplo da aula anterior, o Professor explora o simulador https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/waveinterference_en.html para problematizar o fenômeno da interferência e mostrar as analogias pertinentes entre as ondas mecânicas e eletromagnéticas. O Professor deve escolher primeiramente a opção de apenas uma fonte na simulação. Perguntas-problema devem estar relacionadas com a presença de uma ou mais fontes de onda, como também perguntas tais como: (i) O que entende por Som; (ii) O que entende por Luz; (iii) Como somar ondas? As ondas mecânicas (superfície da água e som) devem ser exploradas nessa simulação. A opção 'mostrar gráficos' pode ser trabalhada, especialmente as diferentes oscilações em relação ao tempo ou em relação à posição das moléculas no meio que transporta a onda. Introduzir o conceito de onda eletromagnética tirando vantagem da simulação que mostra perfeita analogia entre ambos movimentos periódicos. Questionar qual a diferença entre ondas mecânicas e eletromagnéticas com o propósito de definir estas últimas.

- **Momento 2 (15 min)** - *Interferência.* Com a opção de duas fontes de onda no simulador, com giz e na lousa, o professor deve desenhar uma função senoidal numa cor e, com outra cor, a mesma função defasada de metade de seu comprimento de onda. Deve dizer que cada onda é oriunda de uma fonte distinta. Assim, deve demonstrar que a eventual soma das duas ondas podem gerar interferências destrutivas e construtivas dependendo do valor da defasagem, explicando assim as regiões de amplitude de onda resultante nula. O mesmo efeito deve ser explorado com as ondas eletromagnéticas (opção laser no simulador), de maneira a ficar claro que estas últimas também possuem uma frequência que as caracteriza. É o momento de dizer que cada cor é representado por uma determinada frequência e que o espectro eletromagnético contém a luz visível. Uma lousa mostrando todo espectro e suas frequências deve ser mostrado nesse momento.

- **Momento 3 (15 min)** - Estimular a abstração da classe na busca de outros efeitos eletromagnéticos tais como, Sensores de Luz, Raios X, Controles Remotos, Telecomunicações entre outros.

Recursos didáticos: exposição teórica com giz e lousa, utilização de recursos audiovisuais, utilização de simulações de laboratório virtual.

Tópicos importantes: Interferência construtiva e destrutiva e ondas eletromagnéticas.

Tempo: 50 minutos

Guia de uso das ferramentas da cena didática - Aula 2

O simulador usado deve ser acessado no sítio https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_pt_BR.html. Neste mesmo site, há material introdutório de uso deste simulador. Há também informação sobre requisitos básicos para que o simulador funcione no seu computador. Mas, em geral este programa também é bastante amigável e funciona com requisitos mínimos de *software e hardware* instalados. Na maioria dos computadores com os quais trabalhamos, também não foi preciso baixar o programa. Basta rodá-lo no próprio navegador apertando o ícone *play* >.



Fig.3 Impressão de tela do simulador *wave-interference* que mostra a visão lateral de uma onda na superfície de um de água, por exemplo. A fonte geradora desta onda são gotas que caem no tanque a uma frequência constante.

O Professor deve, em primeiro lugar, escolher o simulador na opção ONDAS, cuja tela inicial dever ser o da Figura 3. Para tal ele deve escolher a “visão lateral” do tanque de água. A frequência do pingo da torneira, que é ligado no botão verde, deve estar na metade dos valores de mínimo e do máximo. Esse é o momento de atacar ondas

mecânicas bi-dimensionais (2D) que se propagam numa superfície de um tanque de água, cuja fonte geradora da onda é a torneira que pinga com uma frequência constante.

Em seguida, o Professor deve escolher o simulador na opção INTERFERÊNCIA com parâmetros escolhidos tal como a tela apresentada na Figura 4. Aqui, há duas fontes de onda (duas torneiras) gerando ondas com a mesma frequência. Como podemos ver no canto superior direito da Fig. 4, existem as opções som e laser (luz) além da onda no tanque. Ainda no canto superior direito da Fig.4, existe também um medidor de oscilação, que possui dois sensores, um branco e um cinza, que descrevem a oscilação resultante da soma das duas fontes. Este sensor mostra a oscilação do nível da água em função do tempo para uma dada posição fixa. No Capítulo 2, a equação de onda que caracteriza tal oscilação. Tal formulação deve ser evitada quando da aplicação deste produto, servindo como subsídios teóricos do Professor. A discussão a ser feita nessa aula deverá ter carácter qualitativo tão somente. Note que em posição de interferência construtiva (destrutiva), o sensor cinza (branco) descreve o nível da água apresentando uma amplitude máxima (mínima) de oscilação.

Em seguida, outras telas, na opção INTERFERÊNCIA, podem ser exploradas modificando as escolhas no canto superior direito da simulação. As Figs. 5 e 6 mostram o fenômeno da interferência para as ondas sonoras e ondas eletromagnéticas no mesmo simulador.

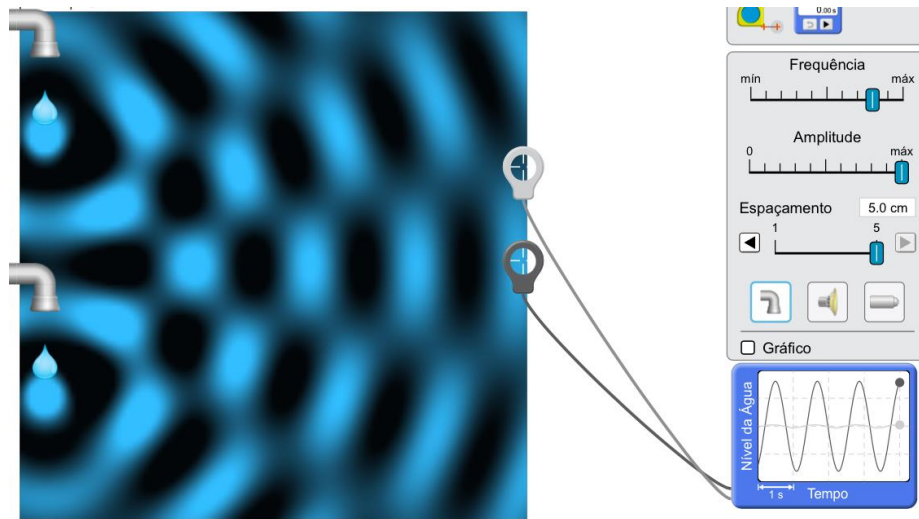


Fig.4 Impressão de tela do simulador *wave-interference* que mostra o resultado da soma de duas ondas 2D, de mesma frequência e amplitude, interferindo uma na outra. Os parâmetros adotados são os descritos no texto. Note que o sensor cinza (branco) é colocado numa região de interferência construtiva (destrutiva). Essas regiões são extremamente sensíveis ao espaçamento entre as fontes de onda.

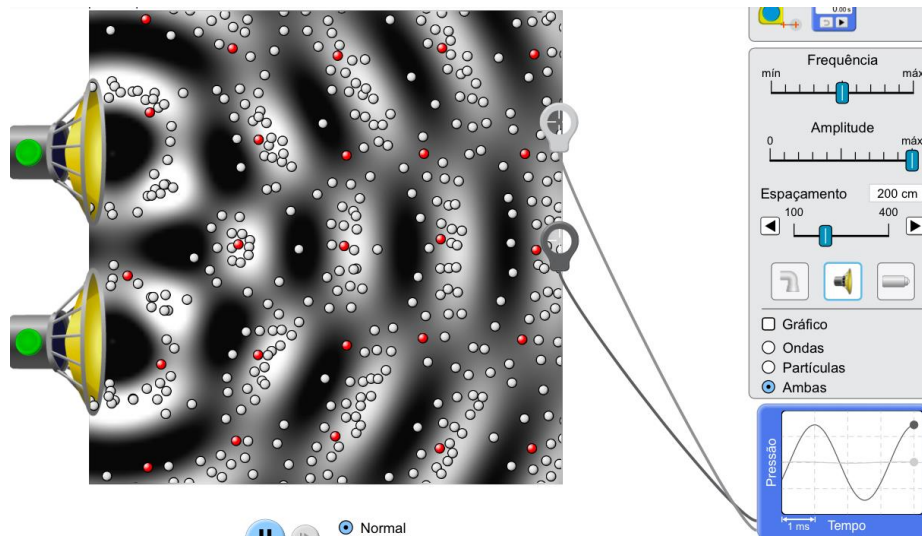


Fig.5 Impressão de tela do simulador *wave-interference* que mostra o resultado da soma de duas sonoras, de mesma frequência e amplitude, interferindo uma na outra. Nessa tela é possível escolher a esquematização das moléculas que são representadas pelas bolinhas brancas e vermelhas.

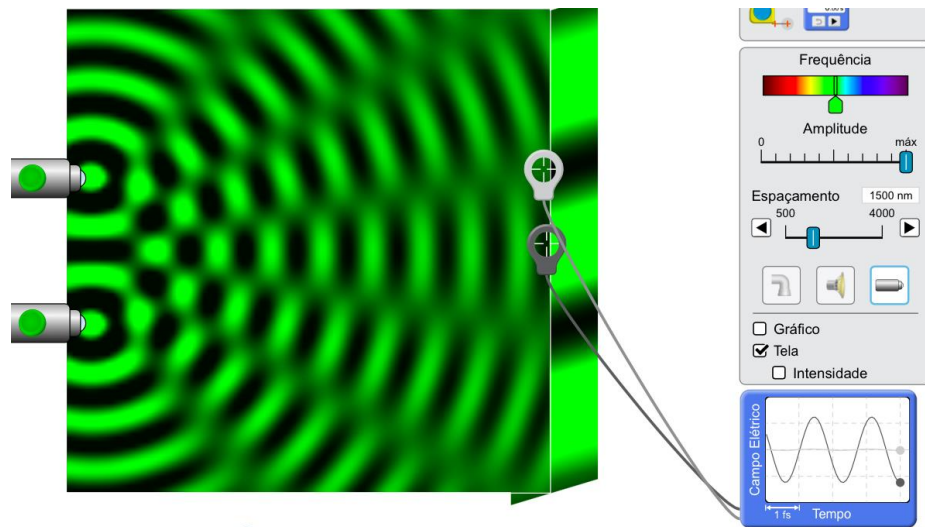


Fig.6 Impressão de tela do simulador *wave-interference* que mostra o resultado da soma de duas ondas eletromagnéticas, de mesma cor verde, interferindo uma na outra. Essa tela é deixada para o terceiro momento pedagógico.

Perguntas-teste e Proposição de Respostas - AULA 2

(1) **Pergunta:** O que é o som e como se propaga?

Resposta: O Som é uma onda que se propaga através de um meio, oscilando as moléculas do meio e transportando energia e informação. Trata-se de uma mecânica.

(2) **Pergunta:** O que é interferência entre ondas?

Resposta: É a soma de duas ondas de mesma. Quando a crista de uma onda é somada com a crista (vale) de outra, ocorre interferência construtiva (destrutiva).

(3) **Pergunta:** O que é Luz?

Resposta: A luz é uma onda que se propaga em todo espaço, não necessitando nenhum meio para transportar sua energia e informação. Trata-se de uma onda eletromagnética.

Aula 3: Efeitos Ondulatórios II

Conteúdo: O Batimento e o Princípio da Indeterminação

Objetivo: Compreender o fenômeno do batimento e associá-lo à relação de indeterminação.

Metodologia: Uso de aplicativos educacionais gratuitos. O método de aula baseia-se nos 3 momentos pedagógicos.

Estratégica Didática

- **Momento 1 (20 min)** - Os alunos são divididos em grupos de 4 e convidados a instalar a versão gratuita do aplicativo *phyphox* do sítio <https://phyphox.org/download/> em no mínimo dois aparelhos no grupo. Em seguida o professor solicita aos alunos que usem as funções gerador de som nos telefones, de maneira que cada um emita frequência próximas f_1 e f_2 . Todos devem ouvir o fenômeno do batimento. As perguntas-problema devem ser focadas na diferença entre o som uníssono, $f_1=f_2$, e o batimento $f_1 \neq f_2$. A principal delas estará na diferença no valor do intervalo de tempo Δt entre batimentos à medida que as frequências se tornam mais diferentes, ou seja, quando $\Delta f = |f_1 - f_2|$ aumenta. Ficará evidente que quando Δf aumenta, o tempo entre batimentos Δt diminui correspondentemente. Esta última frase é importante e deve ser explorada quando o Professor for escrever o princípio da indeterminação.
- **Momento 2 (20 min)** - Na lousa e com o giz, o Professor inicialmente analisará a unidade, no sistema internacional (SI), tanto de Δf quanto Δt e mostrará que a unidade de frequência é o inverso da unidade do tempo. Em seguida o Professor escreve na lousa a fórmula $\Delta f \cdot \Delta t$ e mostra que o resultado deste produto é uma quantidade sem dimensão física. Devido a que no Primeiro Momento pedagógico os alunos experimentaram que Δf é anti-proporcional a Δt , aqui é o momento de escrever $\Delta f \times \Delta t \approx 1$. Assim, neste Momento Pedagógico o Professor deve trabalhar com o fato de (i) o produto $\Delta f \Delta t$ resulte em uma constante adimensional, de maneira que quando a indeterminação no valor da frequência aumenta, o intervalo de tempo entre batimentos diminui, e vice e versa; (ii) o valor mínimo de $\Delta t \geq C / \Delta f$.
- **Momento 3 (15 minutos)** – Exercícios anexos de fixação de (i) aplicação direta de fórmulas; (ii) conceituais; e (iii) tarefa de casa. Cabe aqui a utilização de um violão para mostrar o batimento. O roteiro para produzir o fenômeno de batimento no violão estará no texto dissertativo.

Recursos didáticos: exposição teórica com giz, lousa, utilização de aplicativo gratuito e experimento com instrumento musical (violão).

Tópicos importantes: Princípio da indeterminação

Tempo: 45 minutos

Guia de uso das ferramentas da cena didática - Aula 3

O Professor deve baixar em seu celular o aplicativo *PhyPhox*. Trata-se de um laboratório virtual com uma série de experimentos e funções. Aqui, o Professor deve se restringir ao uso da função *tone generator* (gerador de sons com uma determinada frequência). A Figura 7 mostra a tela do gerador de tom a uma frequência de 440 Hertz.

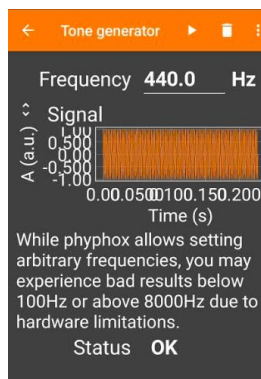
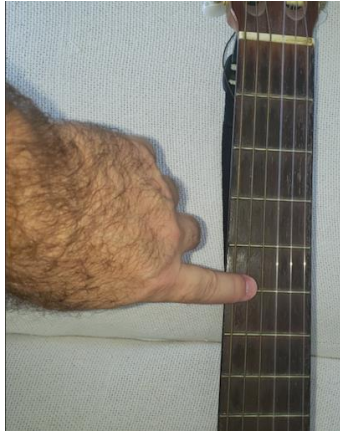


Fig.7 Impressão de tela do simulador da função *tone generator* do aplicativo gratuito para celulares *phyphox*. Ao pressionar a tecla *play*>, o dispositivo emite uma onda sonora de frequência de oscilação de 440 Hertz.

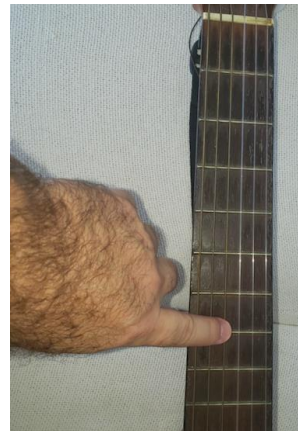
Equivalentemente, para os Colegas Professores, que também gostam de tocar violão (afinado), o mesmo exercício pode ser praticado. O exercício da afinação. O braço do violão de 6 cordas é mostrado na Figura 8(a). Nela, o dedo indica como tirar o mesmo tom de 440 Hertz. O dedo deve ser levemente colocado sobre a quinta corda (da direita para esquerda) em cima do quinto traste (de cima pra baixo). O polegar do outro dedo deve tocar somente essa corda. Se o violão estiver afinado, a frequência de 440 Hertz será emitida. Esta mesma frequência deverá ser emitida se o dedo estiver colocado levemente sobre a quarta corda e em cima do sétimo traste, como mostrado na Fig. 8(b). Ao tocar estas duas notas simultaneamente, a afinação do instrumento pode ser comprovada: estas

duas cordas estarão afiadas entre si se o fenômeno do batimento estiver ausente $\Delta t \rightarrow \infty$,



ou seja, ausência de interferência destrutiva.

Fig.8 (a) Esquerda. 440 Hertz tirada da quinta corda do violão. (b) Direita. A mesma frequência tirada da quarta corda do violão.



Perguntas-teste e Proposição de Respostas -

AULA 3

(1) **Pergunta:** Quando ocorre o batimento?

Resposta: Ocorre quando temos duas fontes oscilatórias com frequências próximas, na interação das ondas emitidas por essas duas fontes existirão pontos onde ocorrerão interferência construtiva, pontos onde ocorrerão interferência destrutiva e pontos intermediários.

(2) **Pergunta:** Aumentando-se a diferença de frequências entre as fontes sonoras, o que ocorre com o intervalo de tempo que acontece o batimento?

Resposta: Diminui, pois de acordo com o princípio de indeterminação, essas grandezas são inversamente proporcionais.

Aula 4: O efeito fotoelétrico

Conteúdo: O efeito fotoelétrico

Objetivo: Introduzir o efeito fotoelétrico como ilustração do conceito de energia da onda de luz, ou do fóton, $E=hf$.

Metodologia: Uso do simulador https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric. Tomamos como base os 3 momentos pedagógicos, mas sem a preocupação de fixar suas fronteiras.

Estratégica Didática

- **Momento 1 (20 min)** – Aqui a fórmula $f = v/\lambda$ da Aula 1 deve ser trazida, onde v é a velocidade (da onda) da Luz, $c = 300.000 \text{ km/s}$. O professor trabalhará com o laboratório virtual <https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>. Depois de haver explicado todos objetos do experimento virtual, o Professor terá o cuidado aqui de manter a voltagem da pilha em 8 V , intensidade e frequência da luz em 0% e 483 nm , respectivamente, e escolher o Sódio como o metal do emissor. O propósito é mostrar que a tensão elétrica da pilha não é a responsável pelo aparecimento de corrente elétrica. A problematização se dá através das seguintes perguntas: (i) O que acontece quando ligamos a luz sobre a placa? e (ii) como descrever a energia da luz? Após haverem elaborado e discutido as perguntas-problema, o professor, preocupado *tão somente* em saber o efeito da incidência de luz no metal, deve colocar e manter a voltagem da pilha em 0 Volt , já que a pilha não deve ser a responsável pela produção de corrente elétrica. Nesse momento o Professor deve arranjar o seu experimento-problema de maneira a evidenciar a proporcionalidade direta entre a velocidade (energia cinética) do fóton-elétron e a frequência da luz projetada sobre a placa emissora. Para isso o Professor deve mostrar a reta no gráfico da energia versus frequência do laboratório virtual. Escolha uma escala tal em que se pode calcular o coeficiente angular da reta de maneira aproximada.
- **Momento 2 (20 min)** – O Professor deve argumentar que se a Luz transfere, de maneira direta, energia cinética aos elétrons do metal à medida que sua frequência aumenta, sua energia, portanto, deverá ser diretamente proporcional à sua frequência, escrevendo na lousa $E \propto f$. Nesse instante, defini-se a constante de Planck h como sendo a constante de proporcionalidade, ou seja, **$E = hf$** , onde $h \approx 4,13 \times 10^{-15} \text{ [eV]}\cdot\text{[seg]}$ é obtida medindo a inclinação da reta. Especial atenção deve ser dada à unidade da constante de Planck. O propósito desta aula na presente sequência termina com a definição da energia da luz apresentada nesse momento pedagógico.
- **Momento 3 (15 minutos)** – Entretanto, poder-se-á estimular a intuição dos alunos notando que os fóton-elétrons existem apenas a partir de um determinado valor de energia da luz **$E=hf > \Phi$** , onde Φ é um valor de energia que *prende (liga)* o elétron à placa. O símbolo maior, $>$, pode então ser convertido em igual, $=$, escrevendo a equação do efeito fotoelétrico **$hf = \Phi + \text{“Extra”}$** , onde a energia **“Extra”** é a energia cinética dos fóton-elétrons.

Recursos didáticos: exposição teórica com giz, lousa, utilização de aplicativo gratuito e recursos multimídia da escola.

Tópicos importantes: Constante de Planck, energia da Luz e efeito fotoelétrico.

Tempo: 45 minutos

Guia de uso das ferramentas da cena didática - Aula 4

A Figura 9 mostra uma impressão de tela do simulador https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric. É importante ressaltar que neste simulador é necessário ter o aplicativo *flash* instalado em seu computador. A tela da Fig. 9 é a primeira que deve ser analisada.

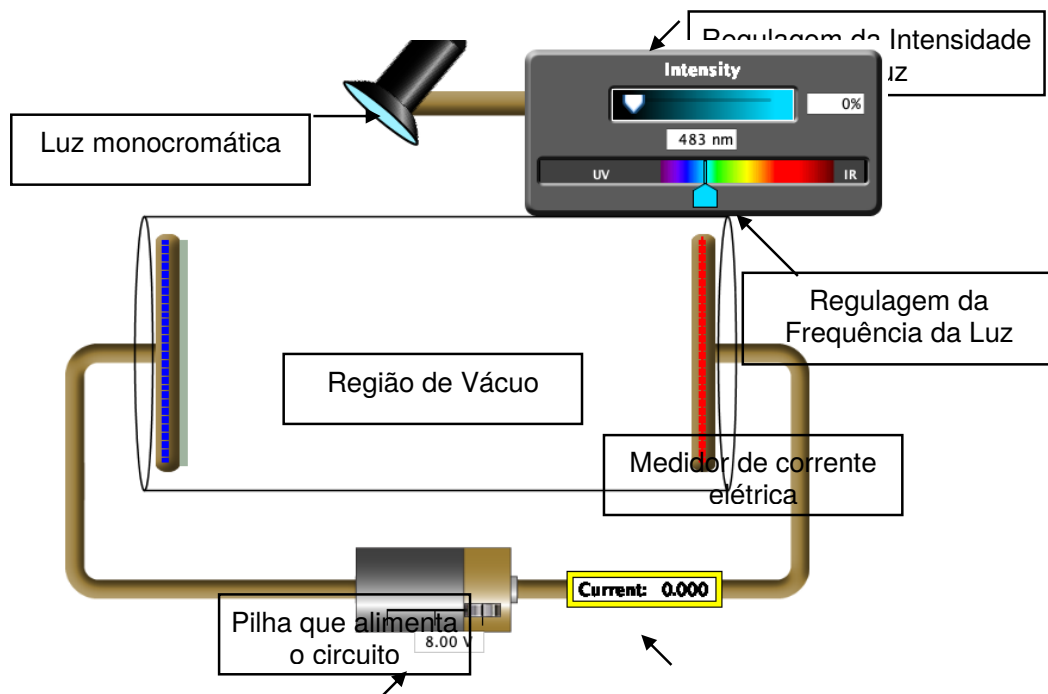


Fig.9 Impressão de tela do simulador https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric para um luz de intensidade nula. A pilha de 8 Voltz não introduz corrente no circuito por ele estar aberto. Porém, há um acúmulo de cargas positivas (negativas) na placa da direita (esquerda). A região de vácuo está envolta por um vidro transparente.

Desta forma, pode-se afirmar que esse simulador representa um experimento (virtual) para estudar o efeito da luz sobre o circuito, com a possibilidade de se variar tanto sua intensidade quanto sua frequência. Lembre-se da relação $f = c/\lambda$, onde c é velocidade da luz.

A próxima tela deve ser preparada de acordo com a Fig. 9. Escolhemos uma cor de luz violeta ($\lambda = 392[nm]$) com 100% de intensidade e vemos os fóton-elétrons serem retirados da placa metálica emissora (a da esquerda). Eles são representados pelas partículas azuis dentro da região de vácuo. Escolhe-se o gráfico da energia cinética deste fóton-elétron em função da frequência da luz. Para isso, deslize o regulador de frequência sobre todo o espectro eletromagnético, ou seja, para todos os valores de frequência (ou comprimentos de onda) possíveis.

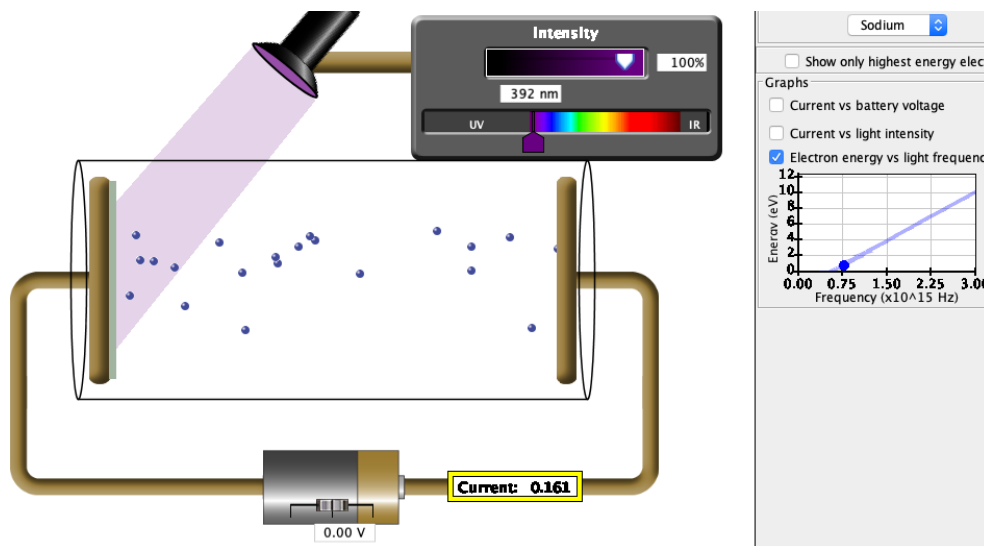


Fig.9 Impressão de tela do simulador https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric para intensidade da luz de

100% e para uma frequência $f = c/\lambda \approx 0,75 \times 10^{15}$ [Hertz]. A pilha é mantida em 0 Voltz e a luz produz corrente no circuito como pode ser visto no medidor de corrente. O gráfico mostra a energia cinética dos fóton-elétrons em função da frequência da luz. Deslize o regulador de frequência sobre todos os valores para construir o gráfico.

Perguntas-teste e Proposição de Respostas - AULA 4

(1) **Pergunta:** Quando ocorre o efeito fotoelétrico.

Resposta: Ocorre quando uma radiação (onda) eletromagnética incide sobre uma superfície metálica e a energia associada à essa radiação provoca a emissão de elétrons pela superfície.

(2) **Pergunta:** O que é necessário para que ocorra a emissão de elétrons pela placa metálica no efeito fotoelétrico?

Resposta: Precisamos de uma energia mínima, associada a um valor mínimo de frequência da radiação eletromagnética incidente.

(3) **Pergunta:** O que é função trabalho?

Resposta: A função trabalho é essa energia mínima necessária para que o efeito fotoelétrico ocorra.

(4) **Exercício:** Se usamos a fórmula $E = hf$, existe uma outra maneira de escrever a relação de indeterminação $\Delta f \times \Delta t \approx 1$?

Resposta: Se h é constante, podemos usar a fórmula $E = hf$ para escrever que $\Delta E = h\Delta f$. Desta forma a relação de incerteza pode ser escrita como $\Delta E \times \Delta t \approx h$.

Texto de leitura extra-aula: O princípio da Incerteza e a Física Quântica

Essa fórmula que você *deduziu* ao responder o Exercício 4 da aula 4 é de vital importância quando estudamos Física Quântica, que é a Física das incertezas. Enquanto

a Física Newtoniana (as 3 leis Newton) procura(m) determinar de maneira precisa a mecânica que ocorre na natureza, a Física Quântica trata de explicar a natureza através de probabilidades de um movimento ocorrer ou não, ou dito de outra forma, a Física Quântica lida com as incertezas inerentes de um movimento. Em um universo quântico, portanto, uma relação de indeterminação, tal como você aprendeu quando estudou o Batimento e ondas, deve ser um princípio básico a ser respeitado. Portanto, lembre-se que qualquer movimento que é descrito por uma onda obedece intrinsecamente o princípio da incerteza (indeterminação), tal como vimos nas simulações da Aula 3. Portanto, seria razoável dizer que a Física Quântica é uma Física de natureza ondulatória, ou dito de outra forma, a Física Quântica procura dar tratamento ondulatório a qualquer objeto em movimento.

Desta forma, na linguagem quântica todas aquelas grandezas que foram estudadas na Física Newtoniana, tais como Posição (em metros no Sistema Internacional — SI), Quantidade de Movimento linear (em Kg.metro/segundo), Energia (em Joule), Tempo, e etc... devem apresentar suas incertezas correspondentes. Vamos chamá-las de Δx , Δp , ΔE e Δt , respectivamente, e discutir um pouco os seus significados. Começamos dizendo que a Unidade de cada uma destas incertezas é a mesma da dos seus valores principais, ou seja,

$$\Delta x \equiv [m], \quad (1)$$

$$\Delta p \equiv \frac{[Kg][m]}{[s]}, \quad (2)$$

$$\Delta E \equiv \frac{[Kg][m]^2}{[seg]^2} \equiv [Joule], \quad (3)$$

e

$$\Delta t \equiv [seg]. \quad (4)$$

Veja, se multiplicamos a Eq. (3) pela Eq. (4), ou seja,

$$\Delta E \Delta t \equiv [Joule][seg], \quad (5)$$

teremos como resultado a mesma unidade da constante de Planck. Da mesma forma, se multiplicamos a Eq. (1) pela Eq. (2), ou seja,

$$\Delta x \Delta p \equiv [Joule][seg], \quad (6)$$

temos igualmente um resultado que também tem a mesma unidade da constante de Planck. Portanto, não é difícil afirmar que as incertezas de qualquer par de quantidades físicas, cujo o produto resulte na mesma unidade da constante de Planck, devem satisfazer o princípio da incerteza de Heisenberg, ou seja,

$$\Delta E \Delta t \approx h \quad (7)$$

$$\Delta x \Delta p \approx h. \quad (8)$$

Veja que as Eqs.(7) e (8) dizem que quanto MAIOR é o valor de uma incerteza, por exemplo Δx , MENOR será o valor de Δp , pois seu produto deve ser sempre igual a uma constante (de Planck). Isso quer dizer que as incertezas nunca podem ser zero na Física Quântica, pois isso violaria o princípio da incerteza.

E o que dizer do significado das incertezas? Na tabela abaixo mostramos exemplos didáticos de como entendê-las.

INCERTEZAS	NO DIA-A-DIA	NA FÍSICA QUÂNTICA
ΔE	Imagine que seu médico receitou uma dieta em que você só poderá consumir 2000 calorias diárias. Um pedacinho de pão de 10 calorias representaria a incerteza da sua dieta, ou seja, $\Delta E = 10$ calorias. Lembre que 1 cal = 4,186 Joule. [13]	Incerteza no valor da ENERGIA medida da partícula em um ambiente quântico.
Δt	Tempo de espera de um encontro marcado para uma determinada hora. Os britânicos têm fama de serem mais pontuais que o brasileiro, portanto a incerteza Δt na Inglaterra seria bem menor que no Brasil.	Tempo de vida de uma partícula quântica. A partícula só existe em um intervalo de tempo finito.
Δx	Imagine uma maratona de 40 Km que você terá de cumprir. A largura de seu passo, ou seja 1 metro pode ser considerada sua incerteza no percurso, $\Delta x = 1$ metro.	Incerteza na medida do valor da posição da partícula.
Δp	O momento linear $p=mv$, onde m é a massa e v é a velocidade. Se a massa é constante, $\Delta p = m\Delta v$. Portanto, Δv pode ser considerado como a imprecisão do velocímetro do seu carro.	Incerteza no valor da velocidade medida da partícula.

Tabela 1. Exemplo de significado de incertezas que podemos encontrar no nosso dia-a-dia e seus conceitos na Física Quântica. [13]

E o que dizer do significado das incertezas? Na Tabela 1 mostramos exemplos didáticos de como entendê-las. A coluna da tabela que mostra exemplos de como podemos compreender incertezas no nosso dia-a-dia (não quântico) dá uma idéia de como o conceito da incerteza está relacionado com um erro na medição. Por outro lado, a razão da existência de incertezas na Física Quântica não é um problema do aparato experimental em si. Sua origem está na própria natureza da matéria e do movimento das objetos e das partículas que a compõem. Existe movimento, ou seja, existe a mecânica das partículas que compõem os átomos e, portanto, devido às suas propriedades quânticas, ao realizarmos medidas de posição destas partículas, por exemplo, estamos interferindo nessa medida pelo simples fato de as observarmos, ou seja, pelo simples fato de sabermos onde elas se encontram.

Terminamos este texto com um direcionamento ao vídeo que mostra quando as características quânticas de um elétron se manifesta: <https://www.youtube.com/watch?v=zKiCEU6P3U0>, ou seja, em que circunstâncias os elétrons da matéria revelam sua natureza ondulatória (quântica). Essa circunstância se dá sempre quando temos uma incerteza na posição do elétron, ou seja, sempre quando $\Delta x \neq 0$ que é a condição necessária e suficiente para que o princípio de incerteza seja respeitado, originando assim um tratamento ondulatório para tudo que se move.

Referências

[1] Aangotti, J. P., *Solução alternativa para a formação de professores de Ciências - Um projeto educacional desenvolvido na Guiné Bissau* - Dissertação de Mestrado, FE/USP - São Paulo: 1982.

[2] Delizoicov, D.; Angotti, J. A., *Metodologia do ensino de ciências*. São Paulo, Cortez, 1994.

[3] Elizoicov D., Angotti J.P., Pernambuco M.M., *Ensino de ciências: Fundamentos e Métodos*. São Paulo: Cortez, 4.ed. 2011.

[4] Sokolowski A., *Ensinando o efeito fotoelétrico de maneira intuitiva*, *Phys. Educ.* **48**, 35, (2013).

[5] Tradução para o Português do artigo de *Albert Einstein, Sobre a teoria quântica da radiação da luz. Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, p. 93 - 99, (2005).

[6] Stanford Encyclopedia of Philosophy (2016), “O princípio da Incerteza”, Seções. 1,2,3 e 4. Disponível em <https://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/#Bohr-ViewUnceRela>. Acesso em janeiro de 2020.

[7] K. E. Johansson and D. Milstead 2008 *Phys. Educ.* **43** 173, “O Princípio da incerteza em classe de aula — ensinando Física Quântica.”