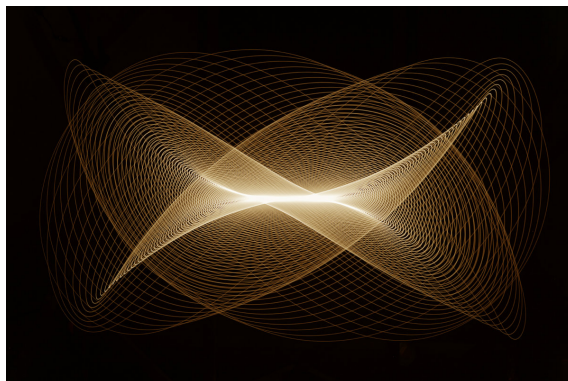


Esse documento mostra uma possível abordagem física e experimental para investigar o fenômeno, **mas não se limite a ela!** Há inúmeras formas diferentes de analisar qualquer problema da IYPT.

Pêndulo em forma de Y

Construa um pêndulo de Bowditch (um pêndulo cujas cordas formam um “Y”). Investigue como os padrões de Lissajous gerados pela massa oscilante dependem de parâmetros relevantes.



1 Enunciado

O enunciado propõe que o movimento do objeto descrito seja investigado em relação aos padrões formados, que são as “Figuras de Lissajous”. O enunciado também destaca que o pêndulo oscila conforme o padrão é desenhado.

Comentários da autora

É importante destacar que “massa oscilante” é uma tradução ambígua. O original em inglês usa a seguinte frase:

“Investigate how the Lissajous patterns generated by the bob depend on the relevant parameters.”

Que foi traduzido (na tradução oficial da IYPT Brasil) como:

“Investigue como os padrões de Lissajous gerados pela massa oscilante dependem de parâmetros relevantes.”

A palavra “bob” no original traz o sentido de movimento para cima e para baixo, enquanto “massa oscilatória” pode levar um participante a entender que o parâmetro massa está variando, quando na verdade significa massa que faz um movimento oscilatório. Combinando-se isso com o fato que o pêndulo de Bowditch frequentemente é construído com massa variável (como nesse vídeo) para facilitar sua visualização, torna-se muito fácil mal interpretar o enunciado.

Não há delimitação explícita de quais parâmetros são relevantes, mas o questionamento da “variação de parâmetros” implica experimentos que variem diversos parâmetros. Espera-se, portanto:

- Uma explicação qualitativa para o movimento do pêndulo;
- Um modelo teórico que preveja esse padrão de movimento e que possa ser comparado com uma abordagem experimental;
- Uma montagem experimental que permita a tiragem de dados relevantes.

1.1 Questionamentos Iniciais

Por que o pêndulo deve ser em forma de Y? Por que o fenômeno não ocorre com um pêndulo regular? Por que as figuras formadas são figuras de Lissajous? Como o tamanho dos fios afeta o problema? Como a escolha do ponto em que as cordas se unem para formar o Y afeta o problema? O sistema consegue formar todas as figuras de Lissajous? Como a distância entre os fios em V afeta o fenômeno? Se um fio for maior que o outro, como o movimento é afetado?

1.2 Parâmetros

Para avaliar extensivamente o fenômeno, considere os seguintes parâmetros relevantes:

- **Caracterização do pêndulo:**

- Proporção entre o tamanho das cordas em V e o tamanho da corda que se conecta ao peso;
- Peso do pêndulo;
- Momento de inércia do pêndulo;
- Tamanho do fio em si;
- Condição de lançamento do pêndulo;

2 Análise Qualitativa

2.1 Conceitos Físicos Importantes

- **Equações paramétricas**

1. **Definição:** Um dos modos de descrever movimentos em duas dimensões, em que as coordenadas x e y estão em função de uma terceira variável t , que geralmente representa o tempo.
2. **Como afeta:** O movimento do pêndulo claramente se desenvolve em duas dimensões, e a avaliação dele através de equações paramétricas talvez seja relevante.

- **Figuras de Lissajous**

1. **Definição:** Família de curvas formada através de equações paramétricas com um formato específico, geralmente representando um movimento harmônico.
2. **Como afeta:** O movimento do pêndulo forma essas figuras, então a análise destas é extremamente relevante.

- **Força peso**

1. **Definição:** Força de atração gravitacional exercida sobre a massa do pêndulo, induzindo seu movimento.
2. **Como afeta:** A principal força que atua no movimento do pêndulo.

- **Arrasto do ar**

1. **Definição:** O arrasto é o conjunto de forças exercidas pelo ar que se opõem ao movimento realizado por um corpo em deslocamento.
2. **Como afeta:** Devido à baixa velocidade do pêndulo, talvez possa ser desprezado, mas é necessário analisar se isso é possível para a velocidade do *seu* experimento.

- **Movimento harmônico**

1. **Definição:** Tipo de movimento físico que caracteriza quando uma força de movimento é oposta por uma força restauradora, fazendo um objeto oscilar em torno de um ponto de equilíbrio.
2. **Como afeta:** O movimento do pêndulo é harmônico, mas existem perdas de energia que afetam esse movimento e devem ser consideradas.

- **Conservação de energia**

1. **Definição:** Condição de um sistema isolado em que a atuação das forças apenas transforma um tipo de energia em outra, sem perdas ou ganhos possíveis.
2. **Como afeta:** O movimento do pêndulo é geralmente tido como conservativo (energia do sistema conservada), mas forças do arraste do ar podem consumir parte da energia do sistema, a dissipando. A consideração de um sistema conservativo pode facilitar os cálculos teóricos, mas raramente é fiel a realidade.

3 Sugestão de Experimental

3.1 Equipamentos e Forma de Extração de Dados

- **Diferentes pesos de laboratório** para investigar como diferentes massas afetam o movimento do pêndulo;
- **Fita métrica ou régua** para relacionar a distância real com a distância no vídeo;
- **Câmera ou smartphone** para capturar o movimento do pêndulo;
- **Software de rastreamento (Tracker ou similar)** para identificar a posição da bola no vídeo;
- **Suporte fixo** para amarrar as linhas do pêndulo;
- **Barbante** para amarrar no funil e criar o pêndulo.

3.2 Metodologia

- **Preparo do sistema:** Escolha um dos pesos disponíveis e o amarre em um pedaço de barbante. Corte dois fios de barbante iguais e os una com cola quente em uma das pontas. Amarre cada ponta solta em seu suporte, garantindo que ambos os fios possuam a mesma inclinação com o suporte. Amarre o pedaço de barbante conectado ao peso no local onde os fios foram unidos com cola quente. Com a mão, coloque-o na posição inicial desejada. Solte o pêndulo.
- **Registro digital:** Coloque a câmera acima do pêndulo, em um plano paralelo à figura formada, para analisar como a trajetória varia ao longo do tempo. Ao fim do vídeo, nomeie o vídeo com os parâmetros usados (tamanho dos fios, peso usado, posição inicial) para identificação posterior.
- **Análise da trajetória:** Importe o vídeo no software de rastreamento. Marque quadro a quadro a posição do peso ao longo do tempo, para obter dados do deslocamento de x e da velocidade e obter a figura de Lissajour formada.
- **Validação experimental:** Sugere-se que o mesmo experimento seja repetido algumas vezes para que uma validação estatística possa ser realizada.

3.3 Cuidados Experimentais, Incertezas e Possíveis Erros

- **Erro humano:** Por vezes, a mão humana pode aplicar alguma força no pêndulo, mesmo que acidentalmente. Para evitar uma distorção dos dados, sugere-se que os experimentos sejam repetidos algumas vezes.
- **Minimização de paralaxe:** Ponha a câmera centralizada em um plano paralelo ao movimento do pêndulo e a uma distância considerável do plano.
- **Ambiente estável:** Mantenha a câmera estável ao longo do experimento, sem realizar vibrações (use um tripé).
- **Configurações do software:** Ajuste o sistema de coordenadas e o momento inicial de análise (frame 0) de forma consistente.

3.4 Limites Experimentais

- **Fio inextensível:** Grande parte dos modelos teóricos assume que o fio usado no experimento não muda de tamanho devido à massa adicionada na ponta. Dependendo do fio usado, esta pode ser uma aproximação razoável, mas sugere-se que um fio que apresenta pouca distensão com peso seja usado (como o barbante!).
- **Distorções de paralaxe:** Se o celular não estiver corretamente alinhado, este pode sofrer efeitos de paralaxe.
- **Visão bidimensional da trajetória:** O movimento de uma das dimensões (z) não é capturado na câmera.
- **Sem medidas diretas:** Essa experimental permite uma investigação do movimento do pêndulo, mas não tem equipamentos específicos para realizar medidas diretas de outras grandezas físicas.

3.5 Investigações Adicionais

Para analisar as diferentes grandezas relacionadas ao fenômeno e/ou contornar os diferentes limites experimentais, você pode tentar:

- Investigar abordagens diferentes para capturar a trajetória do pêndulo (múltiplas câmeras, laser, etc);
- Variar os tipos de fio usados (barbante, nylon) e ver como isso afeta o fenômeno;
- Fornecer ao pêndulo outros pontos de apoio além de apenas dois fios e ver como isso afeta o movimento;
- Desalinhar os dois fios de apoio, tornando um menor e o outro maior e ver como isso afeta a trajetória;

4 Referências para Estudo

- **Kit de Referência da IYPT** (inglês), material excelente para encontrar artigos sobre o fenômeno;
- **Curso de Física Básica: Mecânica (Volume 1)** de H. Moysés Nussenzveig, um curso de física básica que ensina mecânica necessária para o problema;
- **Fundamentos de Física (Volume 1)** de Halliday & Resnick, um livro de mecânica para aprofundar seu entendimento da mecânica do pêndulo;
- **Artigo sobre o pêndulo de Bowditch**, que serve como base introdutória para o desenvolvimento da parte mecânica do problema.