História da Física

História da Física

Keila Tatiana Boni

© 2018 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente
Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica
Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico
Ana Lucia Jankovic Barduchi
Camila Cardoso Rotella
Danielly Nunes Andrade Noé
Grasiele Aparecida Lourenço
Isabel Cristina Chagas Barbin
Lidiane Cristina Vivaldini Olo
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica
Ana Beatriz Perriello Leme
André Luís Delvas Fróes

Editorial
Camila Cardoso Rotella (Diretora)
Lidiane Cristina Vivaldini Olo (Gerente)
Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)
Letícia Bento Pieroni (Coordenadora)
Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Boni, Keila Tatiana
B715h História da física / Keila Tatiana Boni. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.
256 p.

ISBN 978-85-522-1135-8

1. História da física. 2. História da ciência. 3. Ensino de física. I. Boni, Keila Tatiana. II. Título.

CDD 530.53

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2018
Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza
CEP: 86041-100 — Londrina — PR
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br
Homepage: http://www.kroton.com.br/

Sumário

Unidade 1 | A Física na Antiguidade e na Idade Média 7
Seção 1.1 - A ciência na Antiguidade e a física aristotélica 9
Seção 1.2 - A ciência após Aristóteles e contribuições de outras civilizações 27
Seção 1.3 - Astronomia na Antiguidade e na Idade Média 43

Unidade 2 | A Revolução Científica 63
Seção 2.1 - O renascimento científico 65
Seção 2.2 - Mecânica 82
Seção 2.3 - Outras contribuições de Isaac Newton 100

Unidade 3 | Desenvolvimento da física clássica e suas aplicações 121
Seção 3.1 - Os avanços da mecânica 124
Seção 3.2 - Termodinâmica 142
Seção 3.3 - Eletromagnetismo 162

Unidade 4 | A Física dos séculos XX e XXI 183
Seção 4.1 - Relatividade e suas consequências 185
Seção 4.2 - Mecânica Quântica 204
Seção 4.3 - Avanços recentes 222

Palavras do autor

Certos de que a busca permanente da compreensão do mundo e de fenômenos físicos promoveram e, continuam promovendo a ampliação do conhecimento da natureza, apresentamos, nesta disciplina, as etapas históricas essenciais da aquisição dos conhecimentos da Física, em que buscamos traçar com clareza os principais fatos históricos, desde a Antiguidade com as contribuições de Aristóteles e Arquimedes, entre outros, até os avanços recentes, que permitiram uma nova compreensão sobre as partículas elementares que constituem a matéria e o desenvolvimento de tecnologias avançadas.

Muito além de enfatizar a dimensão histórico-cultural do conhecimento físico, objetivamos que com o estudo dessa disciplina você, como futuro professor, se aproprie de fatos e de conceitos científicos de modo contextualizado e desenvolva uma compreensão mais sólida e crítica a respeito do processo de produção e da aplicação do conhecimento científico.

Nesse direcionamento esperamos que até o final dos estudos propostos nesta disciplina você conheça e compreenda as principais contribuições da Antiguidade e do período medieval para a construção do conhecimento científico, a importância e decorrências da revolução científica, os fatos históricos relevantes da física clássica, bem como os avanços recentes da Física e seus impactos para as inovações tecnológicas e implicações em outras áreas da ciência. Esperamos que todo esse conhecimento, que você terá a oportunidade de construir, contribua, futuramente, com seu enriquecimento nas práticas educativas de maneira interdisciplinar e contextualizada, tendo como foco despertar a curiosidade de seus alunos e, assim, auxiliá-los no desenvolvimento do conhecimento cultural e teórico.

Esse livro está dividido em quatro unidades. Na primeira, você estudará quais foram os principais fatos históricos da Antiguidade que marcam o início do desenvolvimento do conhecimento físico, em que enfatizamos a física aristotélica e os primeiros estudos astronômicos. Na segunda unidade você conhecerá pressupostos históricos a respeito do nascimento do método científico e

descobertas marcantes para o conhecimento físico, em que destacamos grandes nomes da área, como o de Isaac Newton. Na terceira unidade, você conhecerá os principais fatos históricos associados ao desenvolvimento da mecânica, da eletrodinâmica e da termodinâmica. Por fim, na quarta unidade, você se dedicará a estudar as principais descobertas no campo de conhecimento da Física que marcaram os séculos XX e XXI, tais como a relatividade e a mecânica quântica, que fundamentaram desenvolvimentos ainda mais recentes.

A disciplina de História da Física busca, portanto, oportunizar a você a construção de conhecimentos que contribuirão fundamentalmente para a sua formação docente. Aproveite todos os momentos que lhe serão proporcionados, faça as leituras complementares indicadas e realize as atividades específicas dos momentos de aula.

Bons estudos!

A Física na Antiguidade e na Idade Média

Convite ao estudo

Durante suas aulas de Física você já percebeu que muitos conceitos teóricos, de certa forma, contradizem seus conhecimentos oriundos de observações e situações cotidianas? Nesta unidade, você conhecerá pressupostos históricos que mostrarão que foi com base em observações e situações cotidianas que conhecimentos científicos foram, pouco a pouco, sendo estruturados, além de muitas vezes se fundamentarem em pré-conceitos filosóficos, religiosos e mitológicos, que tiveram muito impacto nas origens da Física.

Contudo, você verá que esses tipos de conhecimentos apresentavam algumas limitações ou explicações insuficientes para muitos fenômenos físicos, o que demonstrou a necessidade de teorias mais sólidas, pautadas, inclusive, em experimentações e observações, mostrando assim, que o conhecimento está em constante desenvolvimento e transformação.

Objetivando que você seja capaz de demonstrar a compreensão e saber aplicar os conhecimentos da história antiga da Física nas simulações e atividades da sua futura prática educativa, visando despertar a curiosidade e o conhecimento cultural no processo de ensino-aprendizagem de seus alunos, durante esta unidade você se colocará no lugar de um professor de Física, recém-formado nessa área, atuando na 1º ano do ensino médio de uma escola pública, onde boa parte dos alunos costumam ter pouco interesse por disciplinas e aulas estritamente teóricas. Assim, verificando a grande desmotivação dos seus alunos em suas primeiras aulas, você decide procurar os professores de Artes e História que compartilham as mesmas

turmas, a fim de propor um trabalho integrado e interdisciplinar, objetivando motivar os alunos, a partir de pesquisas históricas e trabalhos artísticos, a desenvolverem a curiosidade pela busca dos conhecimentos físicos.

Após diversas conversas com os demais docentes, vocês decidem organizar um dia de divulgação histórica da ciência com a temática: "A Física na Antiguidade e Idade Média". Para isso, vocês decidem dividir a sala em três grupos distintos. O primeiro grupo trabalhará com a temática da ciência na Antiguidade, produzindo um vídeo demonstrativo com os princípios da física aristotélica e suas contribuições na construção da ciência moderna. O segundo grupo trabalhará com o período pós-aristotélico, e deverá propor um experimento simples e de baixo custo que poderá ser realizado no pátio da escola por qualquer aluno que tiver interesse. Já o terceiro grupo, deverá organizar uma peça de teatro sobre a astronomia da Antiguidade, instigando debates e comparações entre as teorias geocêntricas e heliocêntricas.

Quais conhecimentos serão necessários aos seus alunos para que estes atinjam os objetivos dessas propostas? Como você poderá mediar as pesquisas e a busca por tais conhecimentos? Quais reflexões deverão ser consideradas na construção desses conhecimentos? Assim, os conteúdos trabalhados nessa unidade poderão lhe ajudar a resolver tais questões.

Para responder a esses e outros questionamentos, você conhecerá, nesta unidade, as principais contribuições da Antiguidade e do período medieval para a construção do conhecimento científico, destacando os momentos mais marcantes na construção e evolução do conhecimento físico na Antiguidade.

Bons estudos!

Seção 1.1

A ciência na Antiguidade e a física aristotélica

Diálogo aberto

Ao estudar conceitos físicos, como o de força e de movimento, é comum que você, aluno, já apresente uma bagagem de conhecimentos baseados em observações de situações comuns a seus cotidianos. Mas você sabia que é possível associar tais conhecimentos a fatos históricos da Física para melhor compreender esses conceitos, reforçando ou refutando conhecimentos que você já possui? E que, ainda, tal abordagem pode se constituir como fator motivacional para que você estude conceitos da Física?

Para melhor entender essas possibilidades você se colocará no lugar de um professor de Física do ensino médio recém-formado. A fim de motivar seus alunos na aprendizagem da Física em um contexto histórico e interdisciplinar, você decidiu, com ajuda dos professores de História e Artes, dividir uma de suas salas do 1º ano do ensino médio em três grandes grupos, onde cada um deles trabalhará a temática "A Física na Antiguidade e Idade média" em uma abordagem diferente.

O primeiro grupo de trabalho tem o objetivo de divulgar a ciência na Antiguidade através de um vídeo que será exposto na escola. Após uma vasta pesquisa, em livros e também na internet, os alunos decidiram trabalhar especificamente com as teorias desenvolvidas por Aristóteles, destacando a importância histórica desse filósofo no desenvolvimento da ciência física e suas contribuições na construção da ciência moderna, mostrando também algumas limitações de suas teorias. Porém, em uma aula o grupo manifestou uma grande dificuldade em encontrar alguma coisa na teoria desenvolvida por Aristóteles que tenha contribuído para a ciência moderna. Como você, no papel de professor mediador desse trabalho, poderá ajudar esse grupo? Quais os avanços e as limitações das teorias propostas por Aristóteles? Como você poderia conduzir um debate com esse grupo a fim de colaborar com a produção desse vídeo?

Para responder a esses questionamentos você estudará, nesta

seção, as principais contribuições de civilizações antigas para o desenvolvimento da ciência física, com ênfase na física aristotélica. Primeiramente, esses estudos são importantes para sua formação docente para que você conheça os primeiros movimentos na busca por desvendar racionalmente regularidades que permitiram compreender a origem e a natureza do mundo físico, desvinculando-se, aos poucos, de explicações religiosas e mitológicas. E ainda porque o ajudará a compreender como se deu o desenvolvimento do conhecimento científico, para levá-lo a refletir, enquanto futuro professor, que a construção do conhecimento em sala de aula se dá num movimento parecido com a evolução histórica de conceitos científicos.

Não pode faltar

Ainda que civilizações antigas, como a Babilônia e o Egito, tenham proporcionado contribuições para o desenvolvimento de conhecimentos em Matemática e Astronomia, pouco contribuíram diretamente para a Física. Contudo, é importante que você saiba que eles já dominavam o uso de máquinas simples, porém o problema é que boa parte dos conhecimentos que produziram podem ter se perdido ou não ter sido transmitidos apropriadamente para as gerações que os sucederam. Assim como essas duas civilizações, a civilização chinesa também contribuiu indiretamente para o desenvolvimento da Física, a partir do desenvolvimento do sistema numérico e da geometria, que abriram caminho para a Física.

Você começará sua "viagem" aos primórdios do desenvolvimento dos conhecimentos da Física alguns anos mais tarde, sobretudo, na Grécia Antiga. Como você verá, nesse período cada filósofo elaborou sua própria teoria, mas tinham algo em comum: suas teorias prendiam-se às situações cotidianas que buscavam explicar aspectos gerais da natureza e seus fenômenos se fundamentando em teorias mitológicas e religiosas. Eles começaram a se basear em observações, mas ainda misturavam as abordagens, pois a observação empírica ainda não era o fator primordial.

Dessa época, um dos primeiros filósofos de que se tem conhecimento é Tales de Mileto (623 a.C.). Como geômetra, astrônomo e engenheiro, foi o primeiro, de que se tem conhecimento, a fornecer explicações para a origem do mundo, defendendo que

tudo se originou a partir da água. Foi ele quem sugeriu a existência de uma causa física para todos os fenômenos do mundo e, por isso, buscou por causas físicas que explicassem o comportamento das coisas (ROONEY, 2013). Além disso, Tales explorou as propriedades do âmbar friccionado (fonte de eletricidade estática, por atrito) e da pedra que atrai os objetos de ferro, o ímã (LA COTARDIÈRE, 2010).

Devemos nos lembrar que muita informação se perdeu na Antiguidade e, por isso, é provável que Tales não tenha sido o primeiro a fornecer explicações para o mundo e também não foi o primeiro a estudar o âmbar ou o imã, pois devemos nos lembrar que muita informação desse período não chegou até nossos dias. Conhecemos hoje apenas os filósofos cujas obras sobreviveram ao tempo, ou cujo trabalho foi citado por outros filósofos posteriores.

Anaximandro (545 a.C.), contemporâneo de Tales, substituiu essa ideia de que a água seria o elemento básico a partir do qual tudo se originou, pela substância que denominou de apeíron que, segundo ele, era uma substância não gerada, ilimitada e que possuía movimento próprio, capaz de dirigir todas as coisas. Para Anaximandro, foi a partir do *apeíron* que surgiu o cosmos. Tendo em vista mapear suas ideias, recorreu à Geometria e, devido suas teorias se distanciarem de ideias místicas, Anaximandro é considerado o pai da Astronomia.

Diferente da afirmação de Tales de que a Terra (plana) flutuava na água, Anaximandro defendia que a Terra, de formato cilíndrico chato, estava no centro do Universo, em repouso, sem qualquer coisa que a sustentasse, pois, como a Terra estaria à mesma distância de todos os pontos da circunferência celeste, não havia motivos para que ela se movesse para alguma direção. Esse é um ponto que merece destaque, pois, como você verá mais adiante nos estudos dessa seção, a ideia do lugar natural ocupado pelas coisas tem um papel chave na teoria de Aristóteles.

Tanto a ideia de Tales a respeito da água quanto a ideia de Anaximandro a respeito do *apeíron* como substâncias básicas a partir das quais tudo se origina, conduz à ideia de que "o que existe não pode surgir daquilo que não existe e que tudo o que observamos na Natureza nada mais é do que a transformação de alguma coisa" (PIRES, 2011, p. 17), ideia que é base para as leis de conservação. No entanto, a consideração de uma substância orgânica e imortal

como elemento básico e fundamental não permitia que esses sábios da época se questionassem a respeito dos problemas relacionados à origem e causa dos movimentos.

No final do século VI a.C. a filosofia grega passou a preocupar-se mais com questões abstratas do que com problemas do mundo físico, e a escola pitagórica é representativa dessa mudança. Para os pitagóricos, as ideias eram embasadas em hipóteses intuitivas, em números e na estética.

Na contramão das filosofias mencionadas anteriormente, Heráclito (século V a.C.) apresentou um modelo para explicar a natureza que consistia em considerar os processos de mudança, ao invés de centrar-se na ideia de uma substância imutável. Para esse filósofo, "não havia elementos dos quais as coisas eram formadas, mas sim um fluxo contínuo, um processo constante de transformação" (PIRES, 2011, p. 21) e que os aspectos subjacentes à natureza só poderiam ser conhecidos pela razão.

A respeito da razão, Parmênides (530 a.C.- 460 a.C.), que é considerado por alguns historiadores como um dos filósofos precursores do racionalismo, apresentava ideias discordantes das de Heráclito, pois defendia que uma mudança é uma impossibilidade da lógica, que tudo o que existe sempre existiu, que nada daquilo que existe pode se transformar em nada e que somente o pensamento racional pode nos conduzir à verdade (PIRES, 2011).

Exemplificando

Para Parmênides, a imobilidade era algo característico das coisas (corpos, objetos, etc.), contudo, essa ideia de imobilidade não pode ser confundida com a ideia de estática, pois para ele a ideia de imobilidade envolvia a de abarcar todas as formas de movimento no mesmo corpo ou objeto.

Por exemplo, nós vemos ao nosso redor coisas se transformando o tempo todo. Mas, para Parmênides, essa transformação não passava de ilusão.

Segundo a concepção de Parmênides, não podemos afirmar que a transformação de algo o fez se transformar em outra coisa, pois a mudança já era algo inerente em si, ou seja, já fazia parte da constituição dessa coisa e, portanto, não houve transformação.

Em defesa dessa afirmação, Zenão de Eléia (425 a.C.), discípulo de Parmênides, apresentou um conjunto de provas que contrariavam a possibilidade da existência do movimento, em que tais provas eram elaboradas na forma de paradoxos, que tinham por finalidade provar que não é possível completarmos uma jornada em um tempo finito e, portanto, tais paradoxos se referiam à conceitos de espaço, de tempo, de movimento, de continuidade e de infinito.

Pesquise mais

Zenão escreveu cerca de 40 paradoxos, dentre os quais encontramos aqueles que criticavam a ideia de movimento contínuo no tempo e no espaço. Para conhecer alguns desses paradoxos e, assim, compreender as críticas de Zenão relacionadas ao movimento, ao tempo e ao espaço, acesse o link:

<http://www.marilia.unesp.br/Home/RevistasEletronicas/Kinesis/Artigo16.O.Marra.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2018.

Em meados do século V a.C. surgiram defesas de uma visão mecanicista do universo, embasadas na ideia de que "o mundo era constituído por uma infinidade de pequenos átomos, invisíveis a olho nu, eternos, imutáveis e indivisíveis, que se moviam aleatoriamente" (PIRES, 2011, p. 24). No entanto, todas as ideias defendidas nesse período a respeito dos átomos não passavam de filosofias da natureza, ou seja, não eram baseadas na experimentação. Importante enfatizar que isso decorria devido à falta de capacidade técnica, já que relativamente há pouco tempo somos capazes de explorar a estrutura atômica utilizando avançados microscópios eletrônicos.

As primeiras explicações dos fenômenos do mundo físico, em nível microscópico, são atribuídas à Demócrito (470-380 a.C.) e à Leucipo (460-370 a.C.). Deve-se a eles a elaboração das primeiras teorias a respeito das propriedades do átomo e, por terem sido os primeiros filósofos a postularem a existência de uma partícula a partir da qual todas as coisas são originadas, atribui-se a eles a inauguração da escola atomista (CHERMAN, 2005).

Contudo, a crítica racional do conhecimento nasceu em Atenas, na Grécia, sendo grandes nomes desse período Sócrates, Platão e Aristóteles. No caso do pensamento científico, Sócrates não trouxe muitas influências, uma vez que tinha maior interesse nas áreas de

ética e de discurso (dialética).

Platão (427-348 a.C.) foi quem sistematizou algumas ideias já defendidas anteriormente por outros pensadores, como a de que a realidade absoluta é a forma subjacente das coisas, enquanto o que experimentamos, por meio dos sentidos, são apenas uma aparência dessa realidade. Nesse sentido, Platão dividia a realidade em duas vertentes: i) O mundo dos sentidos, que nos proporciona apenas um conhecimento aproximado e, portanto, imperfeito, sobre a realidade; ii) O mundo das essências, as quais ele considerava como eternas, imutáveis, imateriais e perfeitas, também conhecido por Mundo das Ideias ou Mundo das Formas, em que o conhecimento só é possível por meio do raciocínio. Com essa divisão de mundos em aparente e real, surge o dualismo entre duas formas de conhecimento: o empírico e o racional.

Platão também propôs uma teoria física a respeito da constituição do universo, o descrevendo segundo um modelo geométrico. Também foi com base na geometria que Platão propôs sua teoria atômica, utilizando o triângulo para representar o elemento básico do modelo de partículas elementares e, a partir deste, construiu os sólidos geométricos regulares. Cada sólido geométrico foi associado a um elemento básico, ou seja, terra, fogo, água e ar, sendo o dodecaedro, o mais próximo de uma esfera, representante do cosmo (CHERMAN, 2005). A partir dessas construções, a ideia era mostrar que a partir da mistura de vários sólidos e/ou elementos básicos era possível criar tudo o que existe e, inclusive, pela decomposição destes, que era possível realizar transformações de um elemento em outro.

Dentre as obras de Platão vale mencionar o livro *Timeo*, que inclui falas atribuídas a Sócrates e onde Platão discorre sobre o universo.

A física Aristotélica

Aristóteles (384-322 a.C.) foi um filósofo grego que "observava cuidadosamente os fenômenos e elaborava proposições hipotéticas, graças a um grande poder de intuição" (ARAGÃO, 2006, p. 5). Assim como outros sábios da antiguidade, Aristóteles pautava-se em hipóteses advindas intuitivamente para formular leis sem muita verificação. Assim como Platão, ele também defendia que o conhecimento deveria ser construído a partir de percepções

sensoriais do mundo real (conhecimento empírico) para, depois, elaborar regras gerais (conhecimento racional). Assim, a partir do sensorial e de observações o conhecimento era construído por um processo indutivo, mas este só se transforma em conhecimento verdadeiro a partir de um processo dedutivo.

Dentre as ideias defendidas por Platão, Aristóteles acreditava nas formas geométricas como reais, porém, não de maneira independente, ou seja, para ele forma e matéria eram igualmente importantes e inseparáveis. Acreditava, ainda, tal como Platão, que todas as matérias eram compostas por uma combinação de elementos básicos: terra, água, fogo e ar, e que tais elementos podem ser combinados e transformados.

Para melhor compreender as ideias de Aristóteles para o nosso interesse nesse estudo, ou seja, para a construção e desenvolvimento dos conhecimentos da Física, passaremos a abordar os seus principais tratados a respeito da filosofia natural: *Física, Do Céu* e *Metafísica*.

Em seu tratado da *Metafísica*, Aristóteles estabelece seus primeiros princípios a respeito do conhecimento científico. Nesse tratado ele descreve a existência de três tendências teóricas, a Matemática, a Física e a Teologia, em que a Física é a primeira ciência quando não se considera nenhuma substância além daquelas formadas pela natureza, pois, quando existe uma substância imóvel, denominada de primeiro motor, então a Teologia é a filosofia que prevalece. E, como o movimento dos corpos celestes são imutáveis e eternos, então, são matematizáveis (LOCQUENEUX, 1989). Tudo isso será melhor compreendido a partir das discussões que promoveremos a partir de agora, ao descrevermos os demais tratados.

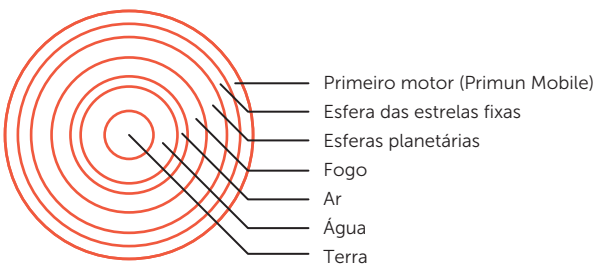
No tratado *Física*, Aristóteles faz referência aos objetos naturais em geral, sejam eles animados ou inanimados, que têm capacidade para movimentarem e se transformarem. No primeiro livro, ele aborda sobre a natureza das coisas, ou seja, ele investiga os elementos constituintes de um objeto natural, o que ele denomina por forma e matéria. No segundo livro, Aristóteles fornece esclarecimentos a respeito do que ele entende por natureza, em que afirma que nada é por acaso, mas que tudo existe por um motivo.

Dos livros III até VII, Aristóteles se dedicou ao *princípio do movimento*, atribuído a objetos animados e inanimados, e tinha

por intuito não apenas descrever o movimento, mas entender suas causas, ou seja, por que ele acontece. Para ele, não seria possível entender a natureza sem primeiro compreender o significado de movimento, uma vez que a natureza pode ser definida como um princípio de movimento e de mudança (CHERMAN, 2005).

No tratado *Do Céu*, Aristóteles apresenta suas ideias a respeito da Cosmologia, ao mesmo tempo fornece esclarecimentos sobre o movimento. Nesse tratado, ele considera o universo como algo eterno, que sempre existiu, e no formato de uma grande esfera, e apresenta o cosmo como duas regiões distintas, em que nelas se aplicam leis diferentes entre si. Uma região, a inferior, compreendia da Terra até a Lua, e era chamada de região terrestre. Além da Lua, encontrava-se a região superior, chamada de celeste. A região terrestre era formada por quatro esferas concêntricas, em que cada uma representava um dos elementos básicos, terra, fogo, água e ar, conforme mostra a Figura 1.1, em que cada uma representaria o lugar natural de cada elemento, do mais denso (terra) ao mais sutil (fogo), vindo, na sequência, as esferas planetárias, das estrelas e do primeiro motor.

Figura 1.1 | O universo aristotélico



Fonte: Peduzzi (1996, p. 53).

Para Aristóteles, o equilíbrio do universo estaria estabelecido quando cada elemento ocupasse o seu devido lugar e, dessa forma, ele estaria parado. Os movimentos, portanto, aconteceriam sempre no sentido de um elemento buscar ocupar o seu devido lugar. Essa ideia de lugar específico para cada elemento é que conduziu Aristóteles a atribuir características a cada elemento como, por exemplo, "mais leve" ou "mais pesado". Logo, o fato de um objeto ser pesado ou leve dependia de sua composição, ou seja, da

proporção dos elementos básicos do qual tal objeto era constituído, e o movimento natural desse objeto estaria atrelado ao movimento natural do elemento predominante em sua estrutura.

Aristóteles considerava que o movimento podia ser considerado em duas grandes categorias: natural ou forçado. Quando o movimento é derivado de si mesmo, como na queda livre de um objeto pesado, o movimento é natural, pois no caso o objeto tende a buscar seu lugar natural. O movimento forçado, por sua vez, correspondia aos casos em que algum movimento de um objeto acontecia no sentido diferente daquele que ele ocuparia naturalmente.

Exemplificando

Um exemplo de movimento forçado, também chamado de violento, seria lançarmos uma pedra para cima. Ela se move com um movimento forçado e, ao cessar esse movimento, considera-se como um movimento natural aquele que a leva ao seu estado natural, ou seja, o mais próximo possível do centro da Terra. Logo, conclui-se que todo movimento natural acontece devido a um propósito final e que todo o movimento violento deve ser impermanente e finito.

Tais ideias sustentaram suas defesas de que o vácuo não existia. Tomando como exemplo o caso de dois corpos de pesos iguais se movendo em meios de densidade distintas, "os tempos necessários para percorrer uma dada distância são proporcionais às densidades dos meios respectivos; isto é, quanto maior a densidade mais lentamente o corpo se move" (PIRES, 2011, p. 41) e, ainda, tais ideias o levavam a considerar que um corpo de massa maior cai mais rapidamente que um corpo de massa menor quando ambos são abandonados de uma mesma altura.

Se o vácuo existisse, então a resistência seria nula e, segundo Aristóteles, sempre deve haver uma relação numérica entre dois movimentos, caso contrário, não faria sentido a relação numérica obtida em outros meios de densidades diferentes, como no exemplo apresentado.

Uma afirmação muito interessante que Aristóteles fornece é a de que:

> **Ninguém pode dizer que um objeto, uma vez colocado em movimento, deveria parar em algum lugar, pois, por que ele deveria parar aqui ou ali? Assim um objeto estará em repouso ou então se moverá até o infinito, a menos que alguma coisa mais poderosa o impeça de assim o fazer (PIRES, 2011, p. 41).**

Ao ler essa afirmação, você pode ter pensado no princípio da inércia. Porém, a intenção de Aristóteles com essa afirmação era apenas a de provar a inexistência do vácuo, pois nele não haveria resistência e, assim, um objeto se moveria infinitamente, o que seria impossível.

Aristóteles também afirmava que tudo aquilo que se move era devido a alguma outra coisa, ou seja, existiria algo que se caracterizaria como fonte desse movimento. Dessa forma, podemos entender que o movimento de um corpo A dependia do movimento de um corpo B que, por sua vez, movimenta-se devido a um corpo C e, assim, sucessivamente. Mas isso não poderia se estender infinitamente. Por isso, Aristóteles defendida a existência do que ele chamava de Primeiro Motor, responsável por ser a causa primeira de movimentação de todas as coisas do mundo.

Mas, o que dizer dos casos em que o movimento era natural, como no dos animais e demais objetos animados? Nesses casos, Aristóteles defendida que eles eram, ao mesmo tempo, o motor e o movido, em que o próprio objeto animado seria o movido e sua alma seria o motor. Quanto ao movimento dos planetas, o motor era uma inteligência celeste, enquanto que a coisa movida seria a própria esfera física dos planetas (PIRES, 2011).

Aristóteles também forneceu algumas explicações para o conceito de velocidade. Para ele, duas coisas teriam a mesma velocidade se gastassem o mesmo tempo para realizar uma mesma quantidade de movimento ou percorrer a mesma distância em um mesmo tempo (PIRES, 2011). Vale destacar que ele utilizava a Matemática conhecida na época, ou seja, na forma de proporções de quantidades de uma mesma grandeza. Logo, a velocidade só era considerada como razões entre distâncias e razões entre tempos. A velocidade como um valor numérico só surgiu muito mais tarde.

No livro VII, Aristóteles apresenta algumas menções a respeito de

força. Essa ideia de força está relacionada à ideia de movimento, em que, para a física aristotélica, quando um objeto se move naturalmente ou quando o movimento é forçado, assim é devido a ação de uma força. No entanto, ele reconhecia a possibilidade de uma força não provocar movimento, pois, por exemplo, assim seria possível um único homem mover sozinho uma pedra enorme. Outra consideração era a de composição de forças, em que duas forças independentes movendo ao mesmo tempo um mesmo objeto, por uma determinada distância, seria equivalente à combinação dessas duas forças ao realizar o mesmo movimento, com o mesmo tempo e distância.

Para melhor compreender as ideias de Aristóteles sobre o movimento, podemos reescrevê-la segundo a relação:

$$v \propto \frac{F}{R}$$

Em que a velocidade (v) de um corpo é diretamente proporcional à intensidade da força aplicada a um corpo (F) e inversamente proporcional à "resistência" do meio (R) em que se movimenta (PEDUZZI, 1996). Esta fórmula em estilo moderno ilustra como, no raciocínio de Aristóteles, a velocidade de queda livre de um corpo não era constante e, assim, voltamos à sua defesa de que corpos pesados tenderiam a chegar mais rápido em seu lugar natural: quanto maior a força peso, maior seria a velocidade e menor seria "resistência" de retorno do corpo ao seu lugar natural.

Assimile

Para Aristóteles existiam dois tipos de força: a força natural, derivada das ideias platônicas, responsável pelo movimento do próprio objeto buscando seu lugar natural ou originado no próprio ânimo de um ser vivo, e a força de puxar, empurrar e também originada nas colisões, responsável por causar o movimento de um segundo corpo. Quando esta última surgia do próprio objeto, era inseparável dele, se constituindo como a sua parte motora.

Vale destacar que o conceito de força não era medido e haviam algumas situações para as quais eram necessárias maiores explicações. No final de seus tratados, Aristóteles questiona: como um projétil (como uma flecha) ou pedra lançada horizontalmente,

continua em movimento mesmo depois que o motor deixou de atuar neles, se tudo aquilo que se move necessita de um motor, com exceção daqueles objetos que se movem naturalmente?

Sua hipótese era de que, no caso de um projétil, o ar, forçado para os lados "pela ponta da flecha, escorria para a parte traseira do mesmo para encher o vácuo e manter o projétil em movimento. O ato de arremessar o projétil dava início a este processo, que uma vez começado, continuava por si só" (PIRES, 2011, p. 44-45). Assim, o objeto cairia quando o movimento do ar se tornasse insuficiente para continuar a impulsionar o objeto. Contudo, o próprio Aristóteles não estava satisfeito com essa afirmação, vindo a formular uma outra que era contraditória: de que o próprio meio adquiria a potência motora do projétil e, assim, o empurrava.

Retomando a ideia de que o Universo era, para Aristóteles, dividido em duas regiões, vamos acrescentar comentários a respeito da região após a Lua. Aristóteles defendia que o céu era constituído por um quinto elemento, que não era gerado e nem era possível de ser destruído: o éter. Segundo ele, esse elemento não existia na Terra e estava em movimento circular constante e, por isso, a região celeste também se encontrava nesse mesmo tipo de movimento.

Para Aristóteles, a Terra se encontrava em repouso no centro do universo, a Lua girava em torno da Terra e as estrelas eram feitas de éter e, por isso, se movimentavam uniformemente, porém, não em torno de si mesmas. Ele afirmava, também, que o centro da Terra é a meta do movimento e, por isso, corpos pesados em queda se movem em direção desse centro. Defendia, ainda, que a Terra é esférica como resultado da tendência natural dos elementos pesados que se movimentam em direção ao seu centro e, esse era o motivo da Terra estar centralizada em relação ao universo.

Reflita

Com o foco nas concepções aristotélicas baseadas em observações e senso comum sobre a Terra, considere o experimento de lançar uma pedra verticalmente para cima. Se a Terra se movimentasse, o que aconteceria com a pedra? O que contradiz o que de fato observamos?

Sem medo de errar

Recorrendo a pressupostos históricos e filosóficos das ciências para elaborar um vídeo, o primeiro grupo de alunos decidiu se dedicar aos estudos a respeito de movimento dos corpos, destacando ideias de Aristóteles. Porém, em uma aula o grupo manifestou uma grande dificuldade em encontrar algo da teoria desenvolvida por Aristóteles que pudesse ser mostrado de maneira mais concreta no vídeo, facilitando, assim, a compreensão da abordagem física proposta de quem irá assisti-lo.

Você, enquanto professor da turma desses alunos, propõe a apresentação de um experimento simples, a partir do qual algumas críticas às ideias de Aristóteles poderão ser promovidas.

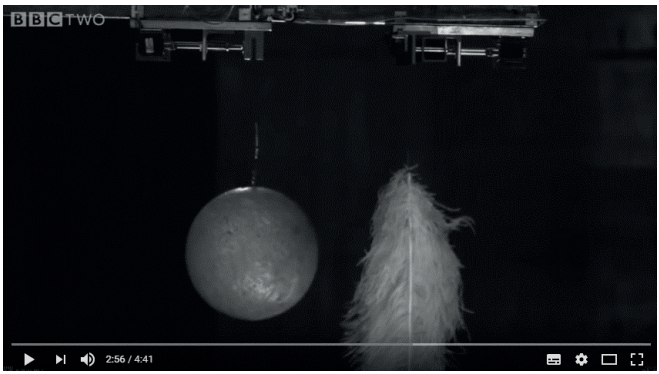
O experimento proposto foi: pegar uma borracha e uma folha de papel e as soltarem de uma mesma altura e ao mesmo tempo. Depois, amassar a folha de papel e repetir o experimento de queda livre dos dois materiais.

Com a realização desse experimento e com base nas pesquisas que os alunos realizaram, eles explicaram no vídeo que a diferença de tempo de queda não foi muito diferente entre ambos os objetos e que eles caíram praticamente juntos e, de acordo com as concepções de Aristóteles, como uma pedra é mais pesada e constituída basicamente do elemento terra, ela cairá porque tenderá a retornar em sentido ao centro da Terra, que é seu lugar natural. Se considerarmos duas pedras, uma maior e uma menor, soltas de uma mesma altura, segundo Aristóteles, a pedra maior chegará primeiro ao solo, pois é constituída por um volume maior do elemento terra do que a pedra menor, o que faz com que ela tenha uma tendência maior para chegar mais depressa à sua posição natural.

Enquanto testavam o experimento antes de iniciarem as gravações, um dos alunos do grupo questiona aos demais: "como essas ideias de Aristóteles podem ter contribuído com o desenvolvimento da ciência moderna? Afinal, é óbvio que o objeto 'mais pesado' chega antes ao solo do que o objeto "mais leve'".

Diante desse questionamento, você orienta os alunos a fazerem uma busca no YouTube e a assistirem ao seguinte vídeo:

Figura 1.2 | Captura de vídeo que mostra a queda de dois corpos em uma câmera de vácuo



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=E43-CfukEgs>. Acesso em: 18 mar. 2018.

O vídeo mostra um experimento realizado na *Space Power Facility*, que é uma câmara de vácuo construída pela NASA, em Ohio (EUA), com o objetivo de realizar experimentos, testar equipamentos e realizar o treinamento de astronautas. Esse vídeo mostra o experimento em que uma bola de boliche e uma pena foram soltos no vácuo em um mesmo instante e, independente da diferença de suas massas, os dois objetos chegaram ao solo ao mesmo tempo.

Após apresentar esse vídeo você conduziu discussões a respeito do que aconteceria com o experimento que realizaram se ele fosse feito em uma câmara de vácuo. Os alunos concluíram que se não houvesse a resistência do ar, ambos os corpos, independente da forma ou da massa, quando abandonados de uma mesma altura e ao mesmo tempo, levariam o mesmo tempo para atingir o solo, e que, diferente do que afirmava Aristóteles, os objetos em queda livre não caem em direção à Terra devido à predominância do elemento terra em sua composição, de modo a conduzi-lo à sua posição natural, mas por causa da ação gravitacional. No entanto, foram as ideias Aristotélicas que impulsionaram, de certa forma, à essas descobertas, daí suas importâncias para o desenvolvimento do conhecimento físico.

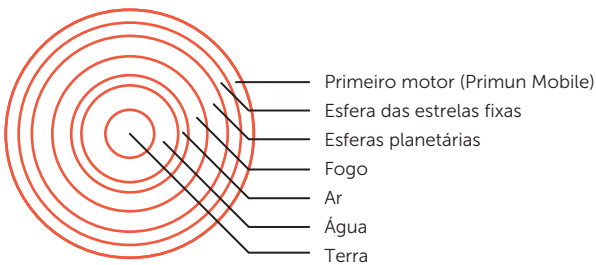
Avançando na prática

O celular como instrumento de pesquisa

Descrição da situação-problema

Você é um professor de física do 9º ano de uma escola da rede privada e decidiu utilizar ferramentas tecnológicas em suas primeiras aulas de astronomia e cosmologia. Pensando na realidade de sua sala de aula, você verifica, que em um primeiro momento, você poderia aproveitar os próprios celulares de seus alunos e assim pede a eles, que façam pesquisas sobre a temática abordada em aula, utilizando-os. Um dos alunos encontra a seguinte imagem:

Figura 1.1 | O universo aristotélico



Fonte: Peduzzi (1996, p. 53).

O aluno faz o seguinte comentário: "esses filósofos não tinham a menor ideia do que é universo. Como eles imaginavam que poderíamos separar os elementos, terra, fogo, água e ar em camadas? A representação desses modelos revela para mim, as limitações desses pensadores". Como você, nesse papel de mediador entre os saberes prévios e os conteúdos aos quais quer chegar, pode utilizar esse momento para enriquecer e valorizar a história da Física?

Resolução da situação-problema

Para conduzir seus alunos a compreenderem os conteúdos atuais a respeito do universo, primeiro você julga importante que eles compreendam quais eram as ideias aristotélicas inerentes à imagem encontrada. Assim, num primeiro momento, você os orienta a utilizar o celular para pesquisar por possíveis explicações

para que Aristóteles chegasse a essas conclusões.

Dentre as diversificadas pesquisas realizadas, um dos alunos encontrou um vídeo (Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6mFLvaV28D0>. Acesso em: 31 mar. 2018), que o fez concluir que as afirmações de Aristóteles eram fundamentadas em outros estudiosos antecessores a ele e condizentes com as possibilidades da época e, portanto, tinham limitações, porém foram muito importantes para todo o desenvolvimento científico que temos atualmente.

Afinal, se os pensadores gregos tivessem acesso aos dados observacionais que temos hoje, graças aos modernos telescópios, chegariam às mesmas conclusões. Na época, haviam dificuldades de se realizar medições precisas, dada a falta de instrumentos observacionais e mesmo de formalismo matemático e estatístico para registrar e arquivar as observações. Nos dias atuais, com os avanços tecnológicos e com todo o conhecimento historicamente produzido, somos capazes de fornecer melhores explicações para fenômenos naturais, inclusive para os relacionados à Astronomia e Cosmologia. Tudo isso indica que o conhecimento atual pode um dia ser considerado como limitado, uma vez que o conhecimento científico não está pronto e acabado, mas está em constante evolução.

Faça valer a pena

1. Apesar de muitos pensadores da Antiguidade apresentarem características comuns no que diz respeito às ideias e concepções sobre fenômenos naturais, algumas são próprias e relacionam-se apenas com um pensador da época. Considerando os pensadores elencados abaixo, faça a correta relação com as concepções e ideias que seguem:

1) Tales.
2) Parmênides.
3) Platão.
4) Aristóteles.

( ) Tudo o que existe, sempre existiu, e a mudança é algo que não é concebível em termos lógicos.

( ) A água é o elemento básico a partir do qual tudo se originou.

( ) Dividiu a realidade em um mundo dos sentidos e um mundo das essências.

( ) A forma e a matéria são, da mesma forma, relevantes e são inseparáveis entre si.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência numérica correta, que relaciona os filósofos e suas concepções.

a) 2, 1, 4, 3.

b) 2, 1, 3, 4.

c) 3, 2, 4, 1.

d) 4, 3, 2, 1.

e) 4, 1, 3, 2.

2. Considerando a física aristotélica, analise as afirmações que seguem:

I. O universo era dividido em duas regiões, em que a região terrestre era considerada como imperfeita, corruptível e sujeita a modificações contínuas.

II. A respeito de mudanças, Aristóteles defendia que elas aconteciam casualmente, ou seja, não havia um propósito intrínseco para que as coisas se movimentassem.

III. Um exemplo de movimento considerado como natural era o de subida de uma pedra quando lançada para cima, pois, uma vez lançada a pedra seguirá naturalmente o seu movimento para cima.

IV. Acreditava que o movimento estava associado à constituição da matéria, uma vez que cada elemento, terra, água, ar e fogo, possuíam lugares definidos no universo.

Estão corretas as afirmativas:

a) I, II e III.

b) I, III e IV.

c) I e IV.

d) II e IV.

e) II e III.

3. Leia o texto a seguir:

> [...] as coisas estão (ou devem estar) distribuídas e dispostas de uma maneira bem determinada; estar aqui ou ali não lhes é indiferente, mas, ao invés, cada coisa possui, no universo, um lugar próprio conforme a sua natureza (É só no seu lugar que se completa e se realiza um ser, e é por isso que ele tende para lá chegar).

Fonte: KOYRÉ, A. **Estudos galilaicos**. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1986. p.22-23.

Após a leitura e análise do texto, é correto afirmar que ele se refere a:

a) Concepção aristotélica de que um corpo busca seu lugar natural, num processo de mudança que objetiva preservar a ordem e a hierarquização estrutural do universo.

b) Concepção platônica de que a realidade final é a forma subjacente das coisas, em que o mundo deve ser dividido em duas vertentes distintas, porém complementares.

c) Concepção de Parmênides de que tudo sempre existiu e não pode ser transformado em outra coisa, mas somente a racionalidade sobre o natural conduz à verdade.

d) Concepção de Heráclito de que nenhum elemento é composto por outro, mas que existe um fluxo constante de mudanças e de transformações.

e) Concepção de Anaximandro de que é a substância *apeíron*, ilimitada, geradora de todas as outras coisas e que possui movimento próprio, a responsável por dirigir todas as coisas ao seu lugar natural.

Seção 1.2

A ciência após Aristóteles e contribuições de outras civilizações

Diálogo aberto

Em algum momento você já deve ter lido ou ouvido falar a respeito das diversas histórias e lendas associadas à Arquimedes, um grande nome da Antiguidade para a Física. Que histórias sobre ele você conhece? Talvez a que ele inventou um raio da morte utilizando espelhos para concentrar a luz solar e incendiar navios romanos que atacaram a cidade de Siracusa, ou a que ele, saindo pelas ruas sem roupas, gritou "Eureka!" após uma descoberta. Mas, até que ponto o que se atribui a Arquimedes é fato ou lenda? Assim, para auxiliar você a melhor julgar as informações encontradas, sobretudo, na internet, é importante que você conheça mais algumas das principais descobertas da civilização grega, em que focaremos no período pós Aristóteles, bem como reconheça as contribuições de outras civilizações.

Nesse direcionamento, convidamos você a se colocar no lugar de um professor de Física do ensino médio que recorrerá a abordagens históricas da ciência para elaborar e propor estratégias didáticas para trabalhar alguns conceitos físicos com seus alunos por meio de um evento cuja temática é "A Física na Antiguidade e Idade Média".

Com o auxílio de outros docentes, focando desenvolver um trabalho interdisciplinar, o segundo grupo de alunos da turma em que você leciona trabalhará com o período pós-aristotélico, e deverá propor um experimento simples e de baixo custo que poderá ser realizado no pátio da escola por qualquer aluno que tiver interesse, focando em teorias de Arquimedes a respeito de hidrostática. Além de abordar conceitos históricos, você espera que seus alunos sejam capazes de relacionar os conhecimentos físicos que serão mobilizados nesse experimento a situações reais, respondendo a questionamentos, como: o derretimento de icebergs provoca a elevação do nível dos mares? E o derretimento dos gelos do

continente antártico, provoca essa elevação? Existe relação entre o volume de água derramado e o volume inicial de um bloco de gelo inserido na água? Qual a relação entre o que foi evidenciado nesse experimento com a história de Arquimedes? (DOCA; BISCUOLA; BÔAS, 2010).

Quais conhecimentos serão necessários aos seus alunos para que atinjam os objetivos dessas propostas? Como você poderá mediar as pesquisas e a busca por tais conhecimentos? Quais reflexões deverão ser consideradas na construção desses conhecimentos?

Para responder a esses questionamentos, primeiro você precisa conhecer as bases históricas em que o princípio de Arquimedes foi formulado. Além disso, é importante que você conheça outros fatos históricos marcantes para o conhecimento científico e que ocorreram desde o período pós-aristotélico, até início da Idade Média. Após os estudos propostos nesta seção, esperamos que você reflita a respeito de outras possibilidades de transposição desses conhecimentos para enriquecer suas futuras aulas de Física.

Bons estudos!

Não pode faltar

Você já sabe que Aristóteles (384 a.C.–322 a.C.) foi um dos grandes nomes que ficou marcado na história da Física. Muitas foram as suas contribuições como sua teoria a respeito do movimento, em que defendia que a causa do movimento era uma "força" exercida pelo próprio ar, impulsionando o movimento de um corpo. A primeira rejeição dessa teoria e fornecimento de explicações irretorquíveis a respeito de movimento deve-se a John Philoponus (475 a.C.– 565 d.C.), que defendeu que o movimento de um corpo lançado para cima não era devido a uma "força" exercida pelo ar, mas devido a uma espécie de "inércia", conhecida por *impetus*, responsável pela manutenção do movimento.

A respeito da teoria do *impetus*, outros estudiosos corroboraram e aperfeiçoaram essa ideia. Dentre os grandes nomes associados a essa teoria podemos citar o do francês Jean Buridan (1300-1358), que defendeu que o *impetus* impresso ao corpo em movimento é proporcional à velocidade e ao peso desse corpo, de forma a possibilitar o seu movimento. Quanto ao papel do ar nesse processo,

Buridan argumentou que ele provoca a progressiva redução do movimento.

Esse conceito de *impetus* ainda será retomado por outros físicos famosos, como Galileu Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1727).

Mas, antes de darmos esse "salto" no tempo, saiba que muitos outros nomes se destacaram na história da Física.

Anos após a morte de Aristóteles, a cultura grega foi disseminada e transformada até chegar em Alexandria, no Egito. Nesse período, podemos destacar as contribuições de Hiparco de Nicéia (190 a.C.–120 a.C.), que propôs grandes contribuições para a área da Astronomia, sendo conhecido, por exemplo, pela descoberta do que hoje conhecemos por *precessão dos equinócios*, que se refere à forma como a Terra gira em torno de si mesma, como se fosse um "pião", devido ao fato de a Terra não ser rigorosamente uma esfera, mas ligeiramente achatada em seus polos, o que implica um deslocamento de seu eixo de rotação (LA COTERDIÈRE, 2010).

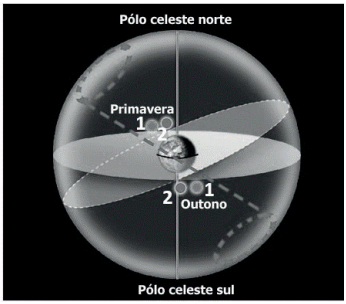
Exemplificando

Na Antiguidade, Hiparco percebeu que com o início da primavera, o Sol passava pela constelação de Peixes. Porém, o que se sabia na época era que o Sol, no início da primavera, passava pela constelação de Carneiro. Isso foi evidenciado porque, a cada ano, os equinócios acontecem em momentos ligeiramente diferentes, devido ao movimento de precessão.

Esse movimento de precessão refere-se a um movimento cônico, como se fosse um "pião", que a Terra realiza.

Na figura a seguir, exemplificamos o equinócio nos dias atuais e o equinócio de 2000 anos atrás, para que você possa visualizar a diferença. Na figura, as esferas marcadas por 1 correspondem a equinócios de 2000 anos atrás e, as marcadas por 2, correspondem a equinócios atuais:

Figura 1.3 | Exemplo ilustrativo da Precessão



Fonte: adaptada de <http://revistagalileu.globo.com/Galileu/0,6993,ECT900784-1941-3,00.html>. Acesso em: 3 maio 2018.

Dentre os grandes nomes que viveram em Alexandria podemos destacar, ainda, o de Euclides e o de Apolônio, que muito contribuíram com a Matemática, sobretudo, com a Geometria, e Arquimedes e Ptolomeu, que propuseram ideias que contribuíram para vários campos das ciências, em especial para a Física. A dedicação de Euclides à Geometria, por exemplo, permitiu que ele contribuísse muito a respeito da propagação e reflexão da luz, conforme descrição no seu tratado *Optica*, dedicado à descrição geométrica de perspectivas (GUAYDIER, 1983).

Pesquise mais

Acessando o link indicado a seguir, você conhecerá mais sobre as contribuições de Euclides para os estudos da *Optica*, conhecendo a sua percepção de espaço segundo aspectos geométricos:

Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ss/v11n4/v11n4a07.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018. p. 882-887.

Arquimedes

Arquimedes de Siracusa (287 a.C.–212 a.C.) além de ter se dedicado à área da Física, também realizou estudos relacionados às áreas da Matemática e da Engenharia. Ao contrário de Aristóteles, que defendia a concepção de que "o mundo era constituído de qualidades e formas que não podiam ser expressas em termos matemáticos precisos e quantitativos" (PIRES, 2011, p.

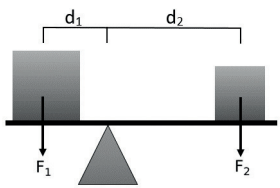
53), Arquimedes defendia a possibilidade de associar elementos geométricos à objetos físicos e, por isso, as provas de suas leis eram realizadas de maneira hipotético-dedutivas usando apenas Geometria (LOCQUENEUX, 1989), com ênfase nas proporções.

Dentre suas principais obras, encontram-se os livros *Sobre o Equilíbrio dos Planos* e *Sobre os Corpos Flutuantes*. No primeiro livro, Arquimedes apresenta suas leis e ideias a respeito do funcionamento de alavancas, polias e centro de gravidade de corpos e, no segundo, apresenta tratados sobre propriedades dos líquidos. Passaremos a tratar de cada um desses livros a partir de agora.

Começando pelo livro Sobre o *Equilíbrio dos Planos*, que trata do campo de estática de corpos pesados, destacam-se os tratados de Arquimedes sobre equilíbrio de alavancas, baricentros e equilíbrio de forças. Atribui-se a ele a afirmação: "Dê-me um ponto de apoio e eu moverei a Terra". Apesar de atribuir-se a ele a lei sobre equilíbrio de alavancas, estudos históricos afirmam que ele apenas a confirmou e provou, pois ela, de certa forma, já era conhecida desde a época de Aristóteles, o qual já havia avaliado situações envolvendo corpos de massas iguais a distâncias iguais, corpos de massas iguais a distâncias diferentes, e corpos de massas diferentes a distâncias iguais, sempre se baseando em proporções.

Pensando em notação moderna, a lei de equilíbrio de alavancas diz que o produto da força (F) pela distância (d) em um lado da base é o igual ao produto do peso pela distância do outro lado (ROONEY, 2013). Observe a figura e a relação a seguir:

Figura 1.4 | Ilustração de uma alavanca



Fonte: elaborada pela autora.

A relação matemática para a alavanca, considerando a ideia de proporcionalidade, é dada por:

$$F_1 \cdot d_2 = F_2 \cdot d_1$$

Assimile

A lei de equilíbrio de alavancas de Arquimedes enuncia que "grandezas comensuráveis se equilibram em distâncias inversamente proporcionais a seus pesos" (MAGNAGHI, 2011, p. 27).

Fisicamente, a alavanca é um corpo rígido utilizado com um ponto fixo apropriado (apoio) para aumentar a força mecânica que pode ser aplicada a um outro corpo rígido (resistência). Em outras palavras, a lei de equilíbrio de alavancas diz que a força aplicada a uma das extremidades da alavanca, quando se tem por objetivo erguer ou movimentar um corpo rígido na outra extremidade, é inversamente proporcional à distância do ponto de apoio. Ou seja, Arquimedes percebeu que, independentemente do quão pesado é um corpo, sempre será possível equilibrá-lo ou deslocá-lo. Para isso, basta aumentar de maneira conveniente a distância.

Reflita

Seria mesmo possível levantar o planeta Terra com uma alavanca, como indica a célebre frase de Aristóteles? Do que precisaríamos para conseguir tal façanha?

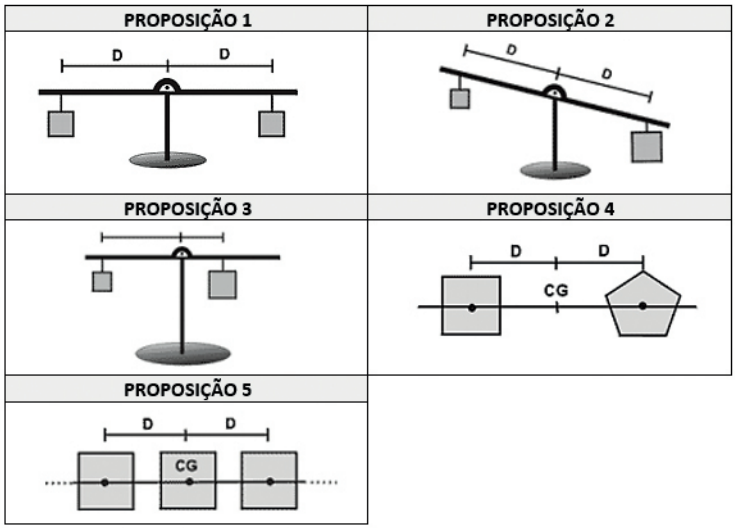
Ainda a respeito das alavancas, e adentrando nas ideias defendidas por Arquimedes a respeito de centro de massa e equilíbrio, encontramos no livro *Sobre o Equilíbrio dos Planos* proposições que foram demonstradas por ele. Dentre essas proposições, algumas são apresentadas a seguir (CARDOSO et al, 2006, p. 224-225):

- **Proposição 1**: "Pesos que se equilibram a distâncias iguais são iguais".
- **Proposição 2**: "Pesos desiguais a distâncias iguais não se equilibram e irão inclinar para o lado do peso maior".
- **Proposição 3**: "Pesos desiguais irão se equilibrar a distâncias desiguais com o peso maior estando à menor distância".
- **Proposição 4**: "Se dois pesos iguais não têm o mesmo centro de gravidade, o centro de gravidade de ambos, tomados juntos, estão no ponto médio de uma linha unindo seus centros de gravidade".

- **Proposição 5**: "Se três magnitudes iguais têm seus centros de gravidade sobre uma linha reta a distâncias iguais, o centro de gravidade do sistema irá coincidir com aquele de magnitude no meio."

A Figura 1.5 a seguir ilustra cada uma dessas proposições:

Figura 1.5 | Proposições a respeito de equilíbrio de alavancas



Fonte: adaptada de Cardoso et al. (2006, p. 224-225).

Além das contribuições citadas, Arquimedes foi quem elaborou outras diversas máquinas simples e dispositivos, motivado a fornecer equipamentos de guerra para a defesa da cidade de Siracusa, que permitiram uma resistência efetiva por alguns anos contra a invasão romana, até a queda da cidade no ano de 212 a.C. Inclusive, acredita-se que ele tenha inventado um dispositivo prático capaz de incendiar navios inimigos, que consistia em um arranjo estratégico de espelhos parabólicos de metal polido para refletir os raios do Sol. Contudo, não se sabe ao certo se de fato esse dispositivo existiu. Em 2005, o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) tentou realizar esse tipo de experimento e, ainda que tenham obtido sucesso para queimar um pedaço de madeira, o sucesso do dispositivo dependeria de diversos fatores, tais como, clima, posição dos espelhos, bem como do tamanho e da distância e posição dos navios inimigos.

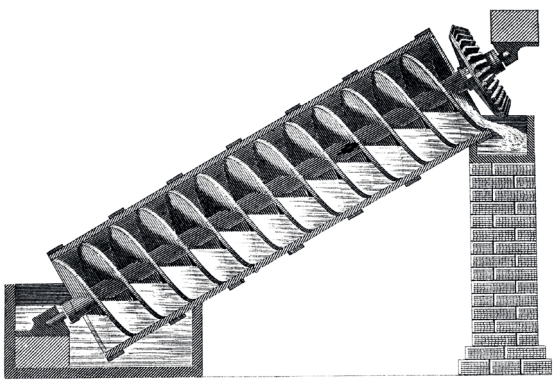
Outra invenção atribuída a Arquimedes, também com o intuito de ser utilizado no cerco à Siracusa, é a Garra de Arquimedes, mais semelhante a uma vara de pescar gigante ou a um guindaste, que seria capaz de ser posicionado abaixo de navios inimigos e iça-los.

Pesquise mais

Acessando o link indicado você assistirá a um vídeo que ilustra como seria o funcionamento da Garra de Arquimedes: <https://www.youtube.com/watch?v=E1YrueoGlbE>. Acesso em 22 abr. 2018.

Outra invenção atribuída a ele é o Parafuso de Arquimedes, que consiste em "uma lâmina giratória em formato de parafuso que se encaixa perfeitamente dentro de um cilindro e é girada manualmente" (ROONEY, 2013, p. 76). Essa máquina foi adaptada para também ser usada para transferir água de lugares de altitude baixa para realizar a irrigação de locais mais altos, equipamento que ainda é utilizado nos dias atuais. A figura a seguir ilustra essa invenção atribuída a Arquimedes.

Figura 1.6 | Parafuso de Arquimedes



Fonte: iStock.

No livro *Sobre os Corpos Flutuantes Arquimedes* dedica à abordagens relativas às propriedades dos líquidos. Certamente a mais conhecida e uma de suas maiores contribuições para a Física: o princípio da hidrostática, que leva o seu nome "o Princípio de Arquimedes".

A respeito desse princípio, existe uma lenda que diz o que levou Arquimedes a chegar à algumas conclusões que o permitiu formular esse princípio.

Assimile

Diz a lenda que Herão, rei de Siracusa, forneceu uma quantidade de ouro a um ourives para a produção de uma coroa, mas desconfiava se a coroa que recebeu era realmente de ouro puro. A massa estava correta, mas parte do ouro poderia ter sido substituído por um pouco de prata. O rei pediu que Arquimedes verificasse o fato. Durante um banho, Arquimedes percebeu que na mesma medida em que seu corpo mergulhava na banheira, o nível de água subia. A partir dessa observação, ele teve a seguinte ideia: fabricar dois blocos de massa igual à da coroa, porém um de prata e outro de ouro, e mergulhar separadamente a coroa e depois esses dois blocos na água. Com isso, poderia verificar e comparar o volume de água deslocado nos três casos. Como o ouro é mais denso do que a prata, se a coroa deslocasse mais água do que o bloco de ouro e menos do que o bloco de prata, estaria comprovado o roubo. Diz a lenda que, devido a empolgação pela descoberta, Arquimedes saiu da banheira a gritar "Euréka!".

Não se sabe exatamente se essa história não passa de uma lenda ou se é verdadeira, mas acredita-se que foi essa a descoberta que deu origem ao princípio que hoje é estudado nas aulas de hidrostática: "Qualquer corpo mergulhado num líquido recebe um impulso ascendente igual ao peso do líquido deslocado" (LA COTARDIÈRE, 2010, p. 101). Portanto, a flutuação se estabelece a partir do equilíbrio entre o peso do líquido deslocado e o peso do objeto inserido nesse líquido.

Assim, Arquimedes conclui que todo corpo mergulhado em um fluido, completo ou parcialmente, experimenta uma força de flutuação – ou empuxo – para cima. O valor desse **empuxo** é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo. Matematicamente, esse princípio pode ser escrito como:

$$E = P_F$$

Em que E é o empuxo e PF é o peso do fluido deslocado. Em notação moderna, descrevemos o peso pelo produto entre a massa (no caso, a massa do fluido deslocado) e a aceleração gravitacional. Logo, também podemos escrever:

$E = m_F \cdot g$.

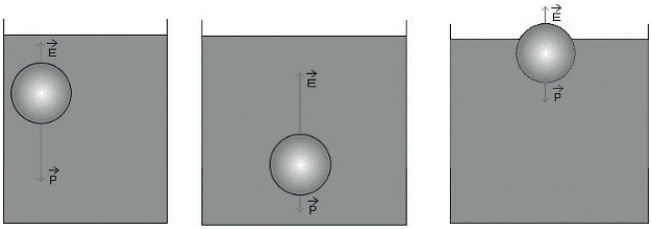
Quando um corpo está totalmente imerso em um líquido, podemos ter as seguintes condições:

- Se o corpo permanece parado no ponto onde foi colocado, então a intensidade da força de empuxo é igual à intensidade da força peso ($E = P$).
- Se o corpo afundar, a intensidade da força de empuxo é menor do que a intensidade da força peso ($E < P$).
- Se o corpo emergir, então a intensidade da força de empuxo é maior do que a intensidade da força peso ($E > P$).

A figura a seguir ilustra essas três condições, respectivamente $E > P$:

Figura 1.7 | Ilustração do Princípio de Arquimedes

$$E = P_f$$



Fonte: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20022/Jeferson/Arquimedes-1.htm>. Acesso em: 22 abr. 2018.

Assimile

O Princípio de Arquimedes pode ser enunciado como: "Um corpo total ou parcialmente imerso em um fluido (líquido ou gás), sofre uma força de empuxo, vertical e dirigida para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo".

Até agora você já estudou o quanto os gregos contribuíram para o desenvolvimento do conhecimento da Física. Ainda que a maioria dessas contribuições não reflitam exatamente as teorias e princípios que estudamos hoje não podemos deixar de reconhecer seus méritos, inclusive, o fato de terem percebido o quanto a Matemática é essencial para a descrição de fenômenos físicos.

Dentre outras contribuições da Antiguidade que merecem destaque, podemos citar as do iraquiano Alhazen (965-1039), que forneceu explicações que subsidiaram a teoria ondulatória. Alhazen defendia que a luz era emitida por corpos luminosos que, ao "iluminar os objetos, é difundida por estes, que se tornam fontes secundárias. Estas reenviam a luz em todas as direções ("em forma de esfera"), que se propaga em linha reta" (LA COTARDIÈRE, 2010, p. 103).

Alhazen também forneceu outras contribuições para o campo da óptica, e elaborou explicações, ainda que confusas, a respeito da teoria das cores. Segundo ele, as cores seriam transportadas pela luz, porém seriam independentes dela. Alhazen estudou também a reflexão da luz em espelhos, o funcionamento de câmaras escuras e forneceu uma descrição do olho como composto por diversas membranas, defendendo o cristalino como o órgão responsável pela visão (GUAYDIER, 1983). As ideias de Alhazen foram tão relevantes que boa parte de suas ideias foram mais tarde retomadas por Kepler e Descartes (LA COTARDIÈRE, 2010).

Sem medo de errar

Pensando na realidade escolar de seus alunos e preocupado em oportunizar uma aprendizagem significativa no campo da hidrostática, você, com o auxílio do professor de História, propôs ao segundo grupo de alunos que participará do evento "A Física na Antiguidade e Idade Média" a elaboração de um experimento simples e de baixo custo, que poderá ser realizado no pátio da escola por qualquer aluno que tiver interesse, focando em teorias de Arquimedes a respeito de hidrostática.

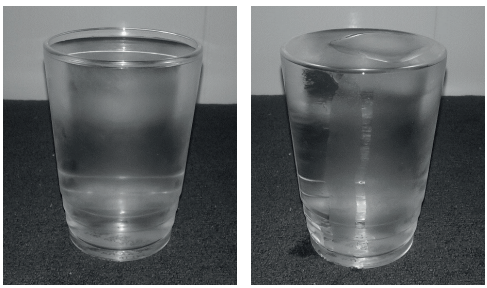
Num primeiro momento, os estudantes realizaram pesquisas bibliográficas, orientados por você e pelo professor de História, a respeito das contribuições de Arquimedes para a Física, atentando-se em distinguir o que de fato era história e o que era lenda.

Após muitas pesquisas, os alunos propuseram um experimento, que consiste em fazer flutuar um bloco de gelo em um copo com água (DOCA; BISCUOLA; BÔAS, 2010). Para isso, eles precisaram dos seguintes materiais:

- 1 copo de vidro transparente bem cheio de água gelada.
- 1 bloco de gelo.

No copo cheio de água gelada, os alunos do grupo colocaram com suavidade o bloco de gelo, de modo que ele se mantivesse flutuando na superfície da água. Com questionamentos, você conduziu seus alunos a evidenciarem que a introdução do gelo provocou o deslocamento de parte do líquido, fazendo com que água escorresse pela superfície externa do copo e que, ainda assim, a água continuaria preenchendo todo o interior do copo, enquanto o gelo permaneceu flutuando na água, estando uma parte imersa e outra parte submersa.

Figura 1.8 | Ilustração do experimento



Fonte: elaborada pela autora.

Você aproveitou esse momento para retomar a lenda que conta a respeito da coroa que o rei pediu para Arquimedes verificar se de fato era constituída apenas por ouro e da descoberta dele a partir de seu banho de banheira. Para isso, você poderia apresentar os vídeos disponíveis em: <https://www.youtube.com/watch?v=X8c3AdgMi9w> e <https://www.youtube.com/watch?v=63yKnPX2jdE>. (acesso em 4 out. 2018).

Após, os alunos foram orientados a aguardarem a fusão completa do gelo e refletir se essa mudança de estado físico iria provocar o derramamento de mais água.

Ao finalizar o experimento, você levantou alguns questionamentos aos alunos participantes do evento:

1) Existe relação entre o volume de água derramado e o volume inicial do bloco de gelo? Qual a relação entre o que foi evidenciado nesse experimento com a história de Arquimedes?
2) O derretimento de icebergs provoca a elevação do nível dos mares? E o derretimento dos gelos do continente antártico, provoca essa elevação? (DOCA; BISCUOLA; BÔAS, 2010).

Com base no experimento realizado e em conhecimentos a respeito do princípio de Arquimedes você espera que seus alunos sejam capazes de responder que o volume de água deslocado é igual ao volume de gelo imerso na água. A partir disso, você espera que os alunos reflitam e estabeleçam relações como o que conta a lenda de Arquimedes a respeito de seu princípio que foi formulado a partir da imersão da coroa e de blocos de outro e de prata na água, observando os volumes de água que foram deslocados, respectivamente.

Comparando o experimento com as situações dadas na segunda questão, você espera que os alunos sejam capazes de ponderar que o caso do iceberg no mar é análogo ao caso do gelo na água: o nível do mar não vai se elevar com o derretimento do iceberg, pois o volume da água proveniente de seu derretimento será igual ao seu volume no estado sólido que já se encontra no mar. Já o caso do derretimento de gelos do continente antártico provocará sim a elevação do nível dos mares, pois seria deslocado volume de água para os oceanos. Com esse questionamento, você conduzirá seus alunos a refletirem a respeito da importância do Princípio de Arquimedes, elaborado na Antiguidade, para compreender fenômenos e situações da atualidade. Você também poderá recorrer a esses experimentos e vídeos na sua próxima aula de hidrostática.

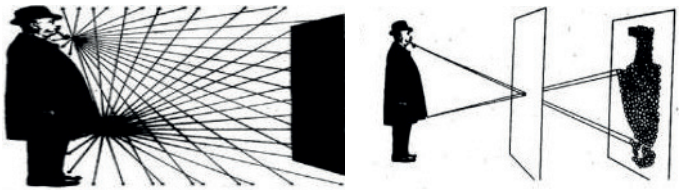
Avançando na prática

Uma aula de óptica baseada em imagens

Descrição da situação-problema

Em suas aulas sobre óptica, visando desenvolver um trabalho didático que envolva uma abordagem histórica e a análise e atribuição de significados a representações imagéticas, você forneceu aos seus alunos a Figura 1.10 (a) e (b), apresentada a seguir:

Figura 1.9 | Representações imagéticas a respeito de óptica



Fonte: <https://goo.gl/PZVmcv>. Acesso em: 10 jul. 2018.

De que maneira você poderia conduzir uma prática pedagógica de modo a utilizar essas imagens para auxiliar os seus alunos a refletirem a respeito de conceitos de óptica, bem como para introduzir aspectos históricos das ciências?

Resolução da situação-problema

No primeiro momento, você pode solicitar aos seus alunos que analisem as imagens e falem a respeito de cada uma delas, e se acreditam que haja entre elas alguma relação. Por meio de questionamentos você pode conduzir os alunos a se atentarem para as linhas retas que são mostradas nas duas imagens. Você lança a pergunta: seria a figura a representação de um espelho? Mas porque a imagem está invertida? Você deve auxiliar os estudantes na percepção de que não se trata de um espelho, mas de uma câmara escura, uma parede com um pequeno orifício onde a imagem é projetada, invertida, em uma sala escura do outro lado.

Depois, você pode orientá-los a pesquisar na internet, seja pelo computador ou pelo celular, as descobertas de Alhazen no campo da óptica e, mais uma vez, solicitar que analisem as imagens, porém, dessa vez, considerando as informações da pesquisa que realizaram. Dessa forma, você auxiliará seus alunos a evidenciarem que as figuras elucidam as defesas de Alhazen a respeito da propagação da luz emitida por corpos luminosos, em que a propagação ocorre em linha reta. A figura (a) ainda te permitirá ir mais além, fazendo referência às ideias a respeito de reflexão difusa, que é essencial para se entender a visão, e que foi um dos resultados de experimentos realizados por Alhazen.

Faça valer a pena

1. Hiparco de Nicéia (século II a.C.) foi um dos grandes nomes para a área de ciências que viveu em Alexandria. A respeito dele, analise as afirmativas a seguir:

I. Afirmou que o corpo é lançado com uma velocidade, mas está submetido a uma força gravitacional proporcional à sua massa e à aceleração da gravidade, que o desacelera com o tempo.

II. Concordou com todas as ideias de Aristóteles.

III. Defendeu que enquanto a força projetora fosse maior do que a tendência natural de o objeto movimentar-se para baixo, o objeto subiria. Esse movimento para cima continuaria, no entanto de modo cada vez mais lento.

IV. Defendeu que o objetivo lançado verticalmente para cima começa a cair quando a força para cima é menor do que a tendência natural do objeto movimentar-se para baixo.

Assinale a alternativa que apresenta afirmativas corretas:

a) I, II e III.

b) II, III e IV.

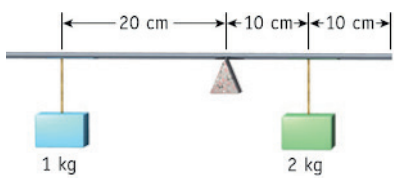
c) I, III e IV.

d) III e IV.

e) II e III.

2. No livro Sobre o Equilíbrio dos Planos, Arquimedes apresenta e demonstra proposições a respeito de centro de massa e equilíbrio. Considerando essas proposições, analise a figura a seguir:

Figura 1.10 | Centro de massa e equilíbrio de um corpo



Fonte: Bauer, Westfall e Dias (2012, p. 374).

Segundo as proposições de Arquimedes, conforme elencadas por Cardoso et al (2006, p. 224-5), assinale a alternativa que corresponde à proposição que explica a situação ilustrada na figura, sabendo que o sistema está em equilíbrio:

a) Pesos que se equilibram a distâncias iguais são iguais.

b) Pesos desiguais a distâncias iguais não se equilibram e irão inclinar para o lado do peso maior.

c) Pesos desiguais irão se equilibrar a distâncias desiguais com o peso maior estando à menor distância.

d) Se dois pesos iguais não têm o mesmo centro de gravidade, o centro de gravidade de ambos, tomados juntos, estão no ponto médio de uma linha unindo seus centros de gravidade.

e) Se três magnitudes iguais têm seus centros de gravidade sobre uma linha reta a distâncias iguais, o centro de gravidade do sistema irá coincidir com aquele de magnitude no meio.

3. A respeito do Princípio de Arquimedes, julgue cada uma das afirmativas a seguir como verdadeira (V) ou falsa (F):

( ) O empuxo é uma força que atua na direção vertical, com sentido para cima.

( ) Um corpo totalmente imerso em um fluido sofre uma força que em módulo é igual ao peso do fluido deslocado.

( ) Um corpo parcialmente imerso em um fluido sofre uma força que em módulo é inversamente proporcional ao peso do fluido deslocado.

( ) Se dois objetos de mesmo volume forem colocados imersos em líquidos de densidades diferentes, sofrerão empuxos iguais.

( ) O Princípio de Arquimedes também serve para explicar o movimento de subida de um balão no ar.

Assinale a alternativa que apresenta as valorações corretas para cada afirmativa, de cima para baixo:

a) V, V, F, F, V.

b) V, F, V, V, F.

c) F, V, V, V, F.

d) V, V, F, F, F.

e) F, V, F, V, F.

Seção 1.3

Astronomia na Antiguidade e na Idade Média

Diálogo aberto

Você já parou para admirar uma bela noite estrelada? Já passou determinado tempo olhando para o céu e imaginando o que há em toda a imensidão e o que será cada ponto iluminado no céu? Se sim, saiba que muitas outras pessoas, desde os tempos mais remotos, também já passaram muito tempo observando o céu, e foi a partir dessas observações que muito conhecimento foi gradativamente construído e evoluído. Por exemplo: você já viu quantas ideias foram elaboradas por Aristóteles, Platão, entre outros, em busca de explicações para fenômenos naturais e para o Universo e seus constituintes. O céu tem fascinado muitas pessoas, de diferentes civilizações, desde a Antiguidade e, conforme você estudou nas seções anteriores, esse fascínio contribuiu com a construção do conhecimento físico.

Quando falamos em Astronomia certamente você pode imaginar observatórios, naves e estações espaciais fornecendo dados a respeito do Universo, planetas, astros, entre outros, por meio de supercomputadores para a análise de estudiosos da área. Mas saiba que os conhecimentos astronômicos são fundamentais e estão presentes também no nosso cotidiano, afinal, a sucessão de dias e noites, as marés, a divisão do tempo (segundos, minutos, horas, dias, semanas, meses, anos, etc.), estações do ano e, inclusive, a possibilidade de vida na Terra, tudo isso pode ser explicado a partir de conhecimentos de Astronomia.

A Astronomia tem um papel de destaque na história da construção do conhecimento físico, não apenas por ter servido por diversas razões práticas, como demarcar o tempo, sobretudo para definir os momentos corretos de plantio e colheita no campo, ou para as navegações, mas porque é capaz de fornecer conhecimentos importantes para o futuro. Afinal, você acha que seria possível a utilização de satélites de comunicação, de Sistema de Posicionamentos Global (GPS), painéis solares, entre muitas outras tecnologias sem um vasto conhecimento astronômico?

Considerando a importância do conhecimento astronômico no decorrer da história da humanidade, você é convidado a se colocar no lugar de um professor de Física da educação básica que decidiu organizar um dia de divulgação histórica da ciência com a temática "A Física na Antiguidade e Idade Média". Com vistas a uma abordagem interdisciplinar, você propõe ao terceiro grupo de alunos a organização de uma peça de teatro sobre a Astronomia da Antiguidade, instigando debates e comparações entre as teorias geocêntricas e heliocêntricas. Durante essas atividades, você também precisará auxiliar seus alunos a respeito de informações que são encontradas na internet, esclarecendo a eles que nem sempre estas são verdadeiras. Essa necessidade emerge, sobretudo quando um aluno menciona que leu que a Terra de fato é plana. Assim, você precisará estar munido de todos os elementos necessários para derrubar a ideia, já aproveitando os elementos históricos no contexto.

Que conhecimentos serão necessários aos seus alunos para que estes atinjam os objetivos dessa proposta? Como você poderá mediar as pesquisas e a busca por tais conhecimentos? Quais reflexões deverão ser consideradas na construção dessa peça?

Esta seção te oportunizará a construção de conhecimentos a respeito das teorias geocêntrica e heliocêntrica sobre o modelo teórico do Sistema Solar, que serão essenciais para responder aos questionamentos propostos. Além disso, você conhecerá quais foram outros grandes nomes e ideias e/ou descobertas astronômicas da Antiguidade e da Idade Média.

Está pronto? Então, vamos começar os estudos!

Não pode faltar

Apesar de faltar documentos que afirmem, não é difícil imaginarmos que os fenômenos astronômicos e a beleza do céu já instigavam a curiosidade desde os povos mais antigos. Inclusive, existem desenhos de constelações gravados em pedras que datam da época neolítica (5000 a 2500 a.C.). Mas, o que se pode de fato afirmar é que durante muito tempo os estudos realizados com o intuito de compreender fenômenos astronômicos foram circunstanciados por concepções míticas e religiosas e, muitas vezes, com objetivos de resolver problemas do cotidiano, como "a determinação das datas das estações do ano para a agricultura, os

problemas ligados à cronologia para a elaboração de calendários solares ou lunares, o sentimento de existência entre o futuro dos homens e o céu, com a astrologia, as religiões, os mitos, etc.". (LA COTARDIÈRE, 2010, p. 189).

Desde muito antes da Era Cristã, babilônios, egípcios, chineses, gregos, entre outros, já observavam e estudavam o céu. Os babilônios, por exemplo, acumularam durante muitos anos registros de observações de eclipses e outros fenômenos, bem como teorias matemáticas que descreviam de maneira precisa os movimentos dos planetas, do Sol e da Lua (LA COTARDIÈRE, 2010). Suas observações e registros podem ser considerados, para a época, bastante avançados, pois já eram capazes de distinguir astros fixos (como as estrelas) de astros errantes (como os planetas).

Pesquise mais

Quando falamos de observações do céu, estamos nos referindo ao que hoje é denominado como Astronomia Observacional. Mas o que efetivamente vemos quando olhamos o céu? Afinal, se olharmos para um céu noturno em local ermo e sem poluição visual, poderemos de fato ter noção de quantas estrelas são visíveis, o porquê do nome Via Láctea para nossa galáxia (uma mancha branca, devido à maior concentração de estrelas). A Figura 1.12 a seguir ilustra esse tipo de observação do céu.

Figura 1.11 | Centro galáctico observado do deserto de Atacama (Chile)

Fonte: <https://goo.gl/VqFU2A>. Acesso em: 8 maio 2018.

Além disso, comparando o céu no início e no fim de uma noite, as estrelas aparentam ter se deslocado. Elas se movem juntas, mas alguns poucos objetos se movem de maneira distinta, como o Sol, a Lua e os planetas. Estes últimos são os astros errantes, pois aparentam se mover independentemente. Para saber mais sobre tudo isso, assista ao vídeo disponível em: <https://youtu.be/huysYcz-AiQ>. Acesso em: 8 maio 2018.

Em suas observações e estudos, os babilônicos contavam, principalmente, com o instrumento gnómon. O gnómon (ver Figura 1.13) é caracterizado por uma vara espetada verticalmente no solo, cuja projeção da sombra permite prover informações astronômicas, sobretudo, relacionadas à medição do tempo e à observação do Sol e da Lua.

Figura 1.12 | *Gnómon*

Fonte: iStock.

Reflita

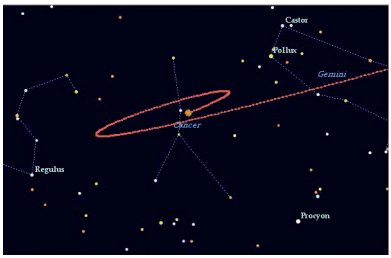
Seria possível construir um gnómon na escola, junto com os estudantes? Quais temáticas da Física poderiam ser abordadas? Haveria a possibilidade de desenvolver um trabalho interdisciplinar utilizando esse instrumento?

A astronomia babilônica, se comparada com a egípcia, era mais sofisticada devido ao conhecimento matemático que tinham, porém, suas contribuições não foram menos importantes. Deve-se aos egípcios as primeiras noções fundamentais sobre o **calendário vago**, de 365 dias e os **decanos**, a partir do qual se estabelece a divisão do dia em 24 horas (COTARDIÈRE, 2010). Tudo isso fazia referência ao movimento do Sol no céu, pois ele executa movimentos que se repetem em um período, ou seja, o local onde o Sol nasce, se põe, e o seu ápice no céu dependem da época do ano. Os dias são mais curtos no inverno e mais longos no verão, justamente porque o Sol traça uma trajetória distinta em cada época do ano. Mas essa variação é cíclica, pois o Sol faz sempre o mesmo caminho no céu na mesma época a cada ano.

Os chineses começaram a observar o céu muito precocemente utilizando observatórios especialmente construídos para essa finalidade aproximadamente em 2.300 a.C. Perceba a antiguidade da data em que a cultura chinesa teve a capacidade de registrar eventos astronômicos que transmitiram para a posteridade! A partir de suas observações, um "relato de um cometa foi registrado em 2296 a.C., de uma chuva de meteoros em 2133 a.C. e de um eclipse solar em 2136 a.C." (ROONEY, 2013, p. 153). Em relação à organização do calendário, os chineses se fundamentavam em observações do Sol e da Lua. Com base no intervalo médio de tempo entre dois equinócios sucessivos de primaveras, os chineses determinaram com rigor satisfatório o ano com 365 dias e mais um quarto de dia. (LA COTARDIÈRE, 2010). Vale lembrar que hoje sabemos que o ano dura mais do que 365 dias e, por isso, essa descoberta pelos chineses em tempos tão remotos é tão fascinante. Aliás, é devido a esse tempo maior do ano que existem os anos bissextos a cada quatro anos, ou seja, aqueles com 366 dias: esse foi o jeito que os astrônomos encontraram de compensar essa defasagem.

Algo que intrigava os antigos observadores do céu é o movimento retrógrado dos planetas. Ao longo dos meses, os planetas (ou astros errantes) movem-se em uma determinada direção no céu. Entretanto, em intervalos regulares, eles se movem em sentido oposto, para depois retornarem a seu caminho original. Para exemplificar esse tipo de situação, observe a Figura 1.14 que ilustra a posição do planeta Marte observado no mesmo horário ao longo de três meses.

Figura 1.13 | Movimento retrógrado do planeta Marte



Fonte: <http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Retrogrado/retrogrado.html>. Acesso em: 14 maio 2018.

A explicação do fenômeno exigiu muita criatividade por parte dos astrônomos da época, e foi fundamental para dar origem à teoria Heliocêntrica que aceitamos hoje.

Pesquise mais

Você já ouviu falar ou já leu sobre o movimento retrógrado dos planetas? Conheça esse tipo de movimento acessando o site.

Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Retrogrado/retrogrado.html>. Acesso em: 8 maio 2018.

Quanto aos astrônomos gregos, Aristarco (c. 260 a.C.) é geralmente considerado o mais bem-sucedido dentre eles:

> **Aristarco calculou o tamanho real da Lua ao observar o tamanho da sombra projetada pela Terra durante um eclipse da Lua. A mais revolucionária de todas as suas ideias foi a sugestão de que os movimentos dos corpos celestes poderiam ser mais facilmente interpretados caso se admitisse que todos os planetas, entre os quais a Terra, giram em torno do Sol. Essa hipótese heliocêntrica era demasiado radical para ser aceita pelos sábios da época e o livro de Aristarco sobre esse assunto não sobreviveu. (BRENNAM, 1998, p.14-15)**

Tales de Mileto (c. 623-547 a.C.) acreditava que as estrelas eram feitas de fogo e tinha uma ideia, ainda que vaga, a respeito da forma esférica da Terra (ARAGÃO, 2006). Ao contrário do que se acredita, a ideia de Terra esférica é muito antiga, e claramente presente nas

teorias aristotélicas, pois considerando que todos os objetos com massa vão em direção a um ponto no centro do universo, e que a matéria pode partir de todas as direções, o formato natural de aglutinação seria justamente uma esfera. Os pitagóricos, por volta de 500 a.C., também consideravam que a Terra teria formato esférico e defendiam que ela estaria localizada no centro do Universo (ARAGÃO, 2006). Anaxágoras (500-428 a.C.) propôs que o Sol é uma rocha muito quente, e Platão (427-348 a.C.), distinguiu os movimentos diurno e anual, bem como apresentou uma ordem geocêntrica dos planetas. A Eudoxo (408-355 a.C.) atribui-se como principal descoberta sua teoria das esferas homocêntricas, ou seja, que têm um centro comum. Por tal teoria afirmava que os movimentos do Sol e da Lua poderiam ser descritos a partir da combinação de movimentos uniformes de duas esferas de centro comum. Apesar dessa teoria ter apresentado muitas deficiências, foi a primeira proposta de representação geométrica do movimento dos planetas, o que mais tarde inspirou os trabalhos de Hiparco (160-125 a.C.).

Mas antes de falarmos de Hiparco, não podemos nos esquecer de outro grande nome da astronomia grega: Aristóteles (384-322 a.C.). Foi ele quem forneceu argumentos a favor de que a Terra é esférica e sugeriu que a Lua estaria mais próxima da Terra do que o Sol, os planetas e as estrelas, por exemplo (ARAGÃO, 2006).

Apesar dos argumentos de Aristóteles terem sido muito importantes para provar a esfericidade da Terra, deve-se a Eratóstenes (276-194 a.C.) a primeira medida da circunferência da Terra. Eratóstenes sabia que perto da cidade de Siena (Egito) havia um poço em que, no solstício de verão, a imagem do Sol era refletida. Considerando que a cidade de Alexandria está no mesmo meridiano que Siena, Eratóstenes considerou ser possível calcular o raio da Terra. Assim, considerando que no dia do solstício de verão, ao meio-dia, o Sol não faria nenhuma sombra, portanto, iluminaria o fundo do poço. No mesmo dia, em Alexandria, Eratóstenes teria percebido que por estar situada mais ao norte, a sombra de um gnómon mostrava que Sol fazia um ângulo de $7°10'$, o que corresponde a $\frac{1}{50}$ de circunferência. Esse ângulo indica a diferença de latitude entre as cidades. Por agrimensura, Erastóstenes constatou que a distância entre Siena e Alexandria era de 800 km (ou 5000

estádios). Assim, concluiu que o valor da circunferência terrestre seria dado por $5000 \times 50 = 25.0000$ estádios, o que corresponde a, aproximadamente, 40.000 km (LA COTARDIÈRE, 2010). Esse experimento de Eratóstenes é considerado um dos mais belos experimentos da Física.

Exemplificando

Após contar a história de Erastótenes, um professor de Física poderá fazer a mesma experiência com seus alunos. Para isso, poderá fixar uma vareta no pátio da escola, ou mostrar em um globo de isopor com palitos e uma lanterna como seria a diferença, entre outros. Enfim, são várias as ideias para realizar esse experimento.

No link indicado a seguir, você conhecerá como foi essa experiência realizada por estudantes do nono ano de uma escola de São Paulo e outra do Rio de Janeiro.

Disponível em: <https://imaginariopuro.wordpress.com/2017/05/16/um-dia-na-vida-de-eratostenes-meca-a-circunferencia-da-terra/>. Acesso em: 8 maio 2018.

Voltando a falar de Hiparco (190-120 a.C.), ele é considerado um dos maiores astrônomos da Antiguidade. Boa parte de suas obras passaram a ser conhecidas a partir de seu seguidor, Ptolomeu (90-168 d.C.), que viveu cerca de três séculos depois. Hiparco foi um grande observador dos céus e grande matemático e geômetra. Inclusive, foram seus conhecimentos matemáticos e geométricos que permitiram a realização de cálculos para movimento de corpos pesados (ARAGÃO, 2006). Ele realizou um grande número de catalogação de estrelas (quase 1.000 novas catalogações), explicou o movimento circular o Sol e da Lua e, apesar de não ter um modelo da trajetória dos planetas, determinou a duração do ano com maior exatidão e discutiu "como os pontos de solstícios e do equinócio se movem lentamente do leste para o oeste quando definidos com base em estrelas fixas – conhecidas como a precessão dos equinócios" (ROONEY, 2013, p. 156).

Após Hiparco, até o século II, não houveram grandes contribuições para a Astronomia. Somente cerca de dois séculos e meio depois de Hiparco que surge um dos maiores nomes da Astronomia da antiguidade: Cláudio Ptolomeu (90-168 d.C.).

A obra mais famosa de Ptolomeu é o *Almagesto*, composto por 13 livros. Devido ao acesso que teve à registros de séculos de observações astronômicas durante o tempo em que esteve na escola de Alexandria, Ptolomeu sintetizou a astronomia antiga em sua obra. Este livro foi tomado como base de conhecimentos por outros astrônomos até o século XVII (PIRES, 2011).

Dentre os conteúdos que constituem a obra *Almagesto*, Ptolomeu apresenta argumentos para justificar sua concepção de que os corpos celestes se movimentam em órbitas circulares, sendo a Terra também esférica e localizada no centro do Universo. Ele negava a possibilidade de movimento rotacional da Terra e, para sustentar esse argumento, afirmava que se a Terra realizasse um movimento de rotação, então uma pedra lançada para o ar, por exemplo, teria um movimento contrário ao da rotação (PIRES, 2011). Por exemplo, uma pedra lançada verticalmente para cima não cairia no mesmo ponto ao retornar.

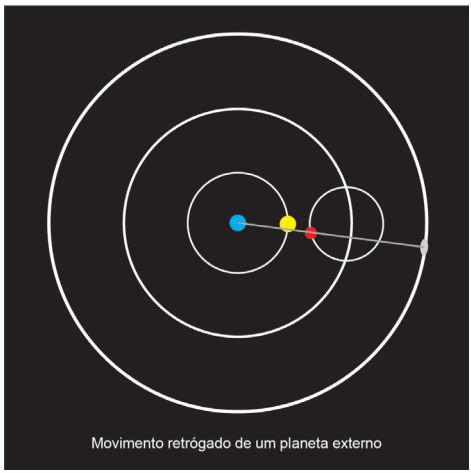
O modelo astronômico de Ptolomeu apresentava uma matemática sofisticada, até então não verificada em outros modelos astronômicos, e cada proposição apresentada em sua obra "é objeto de demonstrações rigorosas e elegantes, baseadas em observações astronômicas, e os seus raciocínios matemáticos são muito sofisticados, com a utilização da trigonometria" (LA COTARDIÈRE, 2010, p. 204). Em seu modelo astronômico, Ptolomeu utilizava círculos ao invés de esferas, uma vez que acreditava que as divindades eram as responsáveis pelos movimentos celestes e o círculo ser considerado pelos gregos como uma forma perfeita e, portanto, divina. Partindo da noção aristotélica de dois movimentos principais nos céus, Ptolomeu defendia que a Terra estaria no centro do Universo, ou seja, "no centro de um grupo de esferas concêntricas" (ROONEY, 2013, p. 156), em que as estrelas fixas, a Lua, o Sol e os planetas girariam em torno da Terra. Esse modelo astronômico é conhecido como modelo **Geocêntrico**.

Nesse modelo, com base nas velocidades angulares dos planetas em relação às estrelas fixas, Ptolomeu estabeleceu a seguinte ordem de órbitas circulares, da maior para a menor proximidade da Terra: Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno, considerando apenas os planetas que eram visíveis na época. Apesar de hoje sabermos que esse modelo é inadequado; vale ressaltar que ele

permitiu a previsão das posições planetárias com grande precisão.

A maior dificuldade de Ptolomeu foi prever corretamente o caminho dos planetas do céu, especialmente para explicar o movimento retrógrado dos planetas, sobre o qual já comentamos. Para explicar isso, ele precisou utilizar a teoria dos epiciclos: os planetas não orbitam segundo um único círculo, mas segundo dois círculos. O primeiro em torno da Terra (que estava no centro do sistema) e o segundo conforme figura a seguir:

Figura 1.14 | Movimento retrógrado do planeta Marte



Fonte: <http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Retrogrado/retrogrado.html>. Acesso em: 14 maio 2018.

O segundo círculo (epiciclo) orbita ao redor da terra, e o planeta gira dentro do epiciclo. Ao caminhar ao longo do epiciclo, ocorre que, para o observador na Terra, em alguns momentos o planeta se move no sentido contrário.

Ptolomeu precisou ainda incluir outros ajustes em sua teoria, e ainda assim enfrentou dificuldades para descrever corretamente a órbita dos planetas Marte e Vênus. Contudo, não se pode negar o grande gênio necessário para construir uma teoria tão completa e robusta, apesar de hoje estar superada.

Após Ptolomeu, houve um declínio gradual dos estudos astronômicos. Apenas no período medieval, a partir do século VII, esses estudos foram retomados pelos árabes, que traduziram

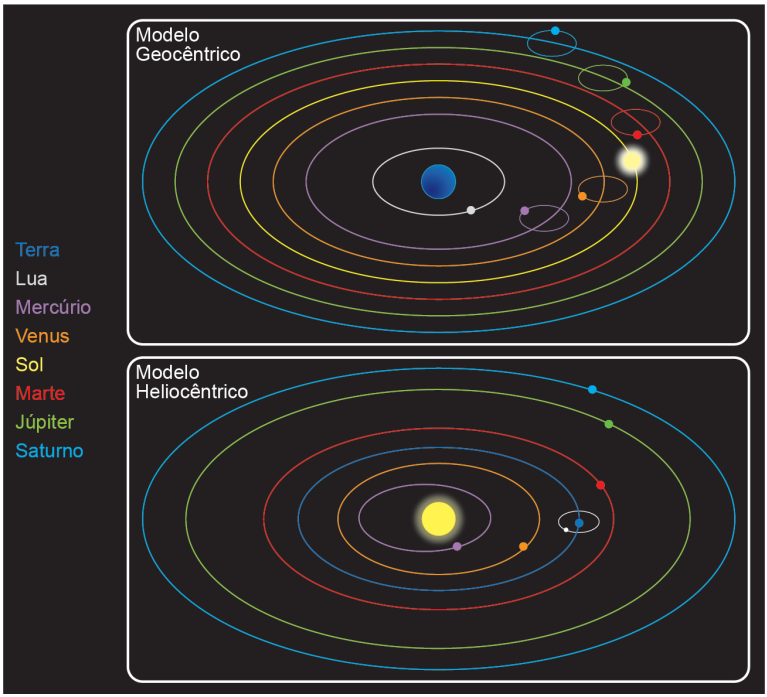
obras de Ptolomeu e deram início à verificações e correções em suas teorias (ROONEY, 2013). Uma importante motivação para os árabes retomarem esses estudos e descobertas astronômicas foram assuntos religiosos. Eles precisavam determinar exatamente os horários para realizar suas orações e determinar a direção da cidade sagrada de Meca a partir de qualquer localidade.

Passados quase dois mil anos, boa parte das ideias de Ptolomeu passaram a ser refutadas, e a concepção de Aristarco – de que a Terra gira em torno do Sol – começou a ser resgatada. O modelo ptolomaico foi mais fortemente questionado pelo astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543), que propôs um modelo astronômico de que os planetas, inclusive a Terra, girariam em torno do Sol e que, ainda, a Terra giraria em torno de si mesma – fenômeno que explicaria a sucessão de dias e noites. Estava sendo estruturado o modelo **Heliocêntrico**.

Na época, a vida intelectual da Europa era fortemente governada pela Igreja Católica, que não aceitava ideias que colocassem em dúvida afirmações bíblicas ou mesmo argumentações dos pais da Igreja que, ao longo do tempo, integraram argumentos aristotélicos ao conjunto de crenças aceitas. Por receio de perseguição, Copérnico demorou muito tempo para divulgar seus trabalhos. Ele concluiu seu trabalho a respeito do modelo astronômico por volta de 1510, mas apenas em 1543, ano de sua morte, um de seus mais importantes trabalhos, Sobre Revolução das Esferas Celestes, foi publicado. Nesse período, seu livro foi quase que totalmente ignorado, apesar de hoje ser considerado a obra que marcou o início da astronomia moderna, contribuindo com o desencadeamento da revolução científica (ROONEY, 2013).

O modelo de Copérnico, apesar de também apresentar alguns problemas, foi o que apresentou de maneira mais correta a disposição dos planetas em relação ao Sol, apresentando a ordem: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno (ver Figura 1.15). Vale lembrar que o modelo heliocêntrico resolve a questão do movimento retrógrado dos planetas. A figura a seguir ilustra os dois modelos astronômicos, o de Ptolomeu e o de Copérnico:

Figura 1.15 | Modelos Geocêntrico e Heliocêntrico



Fonte: <https://goo.gl/7mebNy>. Acesso em: 8 maio 2018.

Assimile

Segundo o modelo Geocêntrico proposto por Ptolomeu, a Terra estaria no centro do Sistema Solar, e a Lua e os demais planetas orbitariam, assim como o Sol, em torno da Terra. Esses astros estariam fixos em esferas concêntricas e na seguinte ordem: Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno. Esse modelo era aceito pela Igreja Católica, que exerceu forte poder na época.

Já no modelo Heliocêntrico, proposto por Copérnico, defendia que a Terra e os demais planetas se moveriam ao redor do Sol, o qual seria, portanto, o verdadeiro centro do Sistema Solar. Apesar de ter sido, muito mais tarde, o modelo mais aceito pela comunidade científica, inspirando trabalhos de astrônomos sucessores como Galileu Galilei (1564-1642), Johannes Kepler (1571-1630) e Isaac Newton (1643-1727), o modelo copernicano não foi muito aceito na sua época, sobretudo pela Igreja Católica, pois tal modelo contradizia as crenças aceitas.

Devido à hesitação de Copérnico, durante muito tempo, em publicar suas obras ou, até mesmo, devido às oposições e poder da Igreja Católica, poucos astrônomos aderiram à cosmologia heliocêntrica por volta do século XVI. Dentre os poucos astrônomos que aderiram a tal teoria, destacamos Giordano Bruno (1548-1600), que foi um dos primeiros a defender publicamente o heliocentrismo. Em 1600 ele foi condenado à morte pela Inquisição e queimado vivo.

Pesquise mais

Conheça a concepção de Giordano Bruno lendo o seguinte artigo: <https://www2.ufrb.edu.br/griot/images/vol9-n1/1.GIORDANO_BRUNO_-_ENTRE_O_GEOCENTRISMO_E_O_HELIOCENTRISMO_-_Ideusa_Celestino_Lopes_UVA.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2018.

Ao final do artigo, você conhecerá um pouco mais sobre os modelos de Ptolomeu e de Copérnico. Contudo, a parte a que o artigo se refere à Giordano Bruno concentra-se entre as páginas 17 e 21.

Uma figura brilhante para a Astronomia e que sucedeu a Copérnico, foi o dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601). Ainda aos 16 anos, uma das observações celestes realizadas o fez identificar falhas nas tabelas planetárias de Ptolomeu e de Copérnico. O que ele observou foi a conjunção entre os planetas Júpiter e Saturno, que havia ocorrido com dias de atraso se comparado às informações das tabelas mencionadas.

Em 1572, Tycho Brahe observou uma estrela mais brilhante do que Vênus em um lugar onde antes não havia uma estrela e, devido ao seu brilho intenso, ela permaneceu visível a olho nu por algumas semanas durante o dia e por dezoito meses durante a noite (PIRES, 2011). Essa estrela era o que hoje conhecemos por supernova. Foi a partir dessa observação que ele publicou uma de suas mais importantes obras em 1573: De Nova Stella. Ainda a respeito dessa estrela, ele observou que ela era uma estrela fixa que estava além da Lua e, em 1577, observou e conseguiu provar que um cometa era um fenômeno sublunar, e que estava muito distante da Lua. Tudo isso causou um forte impacto na comunidade que se interessava na época por assuntos astronômicos, pois ambas as observações e teorizações contradiziam as teorias aristotélicas a respeito do mundo supralunar e das esferas concêntricas.

Ainda em 1577, Tycho Brahe recebeu do rei Frederico II da Dinamarca a ilha de Hven, onde construiu um observatório que contava com os melhores e mais caros instrumentos astronômicos daquela época, o que permitiu que ele realizasse observações astronômicas muito precisas por vinte anos. Em 1597 ele deixou a ilha e se estabeleceu em Praga, onde continuou suas observações, ainda que com instrumentos mais limitados, até a sua morte.

Os estudos de Tycho Brahe foram fundamentais para as descobertas posteriores realizadas por Johannes Kepler (1571-1630).

Sem medo de errar

No dia do evento organizado para divulgação histórica da ciência, cuja temática é "A Física na Antiguidade e Idade Média", você propôs ao terceiro grupo de alunos a organização de uma peça de teatro sobre a Astronomia da Antiguidade, instigando debates e comparações entre as teorias geocêntricas e heliocêntricas.

Para isso, você orientou seus alunos a realizarem pesquisas bibliográficas a respeito de tais teorias e a elencarem quais os pontos principais a respeito de cada uma delas. Ao fazer isso, os estudantes poderiam ter a ideia de organizar um teatro que simulasse um júri, em que um dos alunos representaria Ptolomeu e outro, Copérnico. Você poderia achar a ideia interessante, mas deveria pontuar que esse encontro seria apenas fictício, pois havia uma distância temporal de cerca de dois mil anos entre esses dois importantes astrônomos. Você poderia também estabelecer que seria necessário escolher uma questão importante para debate, sugerida por um dos alunos, por exemplo: *Qual é o modelo de Sistema Solar correto? Heliocêntrico ou Geocêntrico*?

Mas, antes desse debate, ainda havia um outro: alguns alunos mencionaram que encontraram na internet informações de que a Terra é de fato plana. Você esclareceu que nem sempre as informações da internet são verdadeiras, e que é necessário ter cuidado em identificar que sites são ou não confiáveis. Utilizando o celular, rapidamente alguns alunos encontraram informações para debater a ideia de que a Terra é plana. O professor poderia lembrar todos que já na época dos gregos, Erastótenes realizou a demonstração da esfericidade da Terra ao analisar a inclinação do Sol em duas cidades, e inclusive conseguiu calcular o raio da Terra

com impressionante precisão. Aristóteles já sabia que o movimento de atração que rege os corpos deveria naturalmente formar objetos esféricos no universo, como é o caso do que hoje conhecemos como gravidade. Atualmente, sabemos que os aviões e navios realizam frequentemente voltas completas no mundo, retornando ao mesmo ponto. Além disso, temos fotos tiradas por satélites, mostrando a Terra a partir de vários ângulos.

Dando início ao debate que seria promovido no teatro, um dos alunos do grupo foi selecionado para representar o juiz, enquanto que os demais, foram divididos em dois grupos: um deles prepararia argumentos e contra-argumentos a favor de Ptolomeu e, o outro, a favor de Copérnico. Você poderia ainda orientar que os argumentos utilizados fossem mais recentes no debate que seria promovido. O papel do juiz nesse júri seria avaliar, imparcialmente, as argumentações de cada um dos lados envolvidos no debate e decidir, por fim, qual o lado vencedor, considerando as melhores argumentações.

Você também poderia participar desse teatro, assumindo o papel de mediador dos debates, dirigindo o processo e passando a palavra aos grupos.

Dentre os argumentos que poderiam ser utilizados pelo grupo à defesa de Ptolomeu, mencionaram que a teoria geocêntrica era a correta porque: a) Quando observamos o céu, as estrelas parecem se mover em conjunto, e parecem luzes encrustadas em uma grande esfera; b) A Terra aparenta ser sólida, imóvel, em nossa experiência do dia a dia. Seria absurdo acreditar que ela se gira a uma velocidade imensa; c) Os planetas, lua e sol descrevem movimentos próprios, bem descritos por um movimento baseado em círculos; d) O modelo é tão bom que descreve até o movimento retrógrado dos planetas, utilizando os epiciclos; e) O círculo é uma forma geométrica perfeita e, por isso, é adequada para descrever o movimento dos astros.

Dentre os argumentos que poderiam ser utilizados pelo grupo à defesa de Copérnico, mencionaram que a teoria heliocêntrica era a correta porque: a) A sucessão de dias e noites é uma das consequências de que a Terra realiza o movimento de rotação; b) A Terra não é o centro do Universo, mas é apenas um pequeno astro que, como todos os demais, gira em torno do Sol; c) Foi

fundamentada em descobertas mais revolucionárias, frutos do período renascentista; d) A teoria de Copérnico explica o movimento retrógrado dos planetas de maneira mais natural, sem a necessidade de um epiciclo; e) O modelo de Copérnico descreve de maneira mais precisa o movimento dos planetas; f) Ptolomeu teve dificuldades em prever as órbitas de Marte e Vênus com seu modelo.

A partir dos argumentos apresentados, qual seria o grupo que o juiz escolheria como vencedor?

Vale ressaltar que o papel do professor é estimular os estudantes a valorizarem os argumentos fornecidos pelos alunos de acordo com estudos da História da Física, muito mais do que os argumentos de autoridade.

Você poderia deixar a orientação ao juiz e, aos demais alunos do grupo, que apenas os argumentos que deveriam ser ponderados, para a escolha do vencedor, deveriam ser independentes do que, atualmente, a comunidade científica julga como sendo corretos.

O mais importante nesse júri simulado é compreender as duas grandes teorias astronômicas estabelecidas, conhecendo seus fundamentos e defesas, bem como contribuir com a formação integral dos alunos, uma vez que é uma atividade capaz de estimulá-los a criticar, analisar, se posicionar frente a um debate, defender suas ideias e se expressar.

Avançando na prática

Medição do planeta Terra: refazendo o experimento de Eratóstenes

Descrição da situação-problema

Você é um professor de Física que, em conjunto com professores de Matemática, História e Geografia, propôs um projeto que envolve várias escolas do país. Uma das propostas nesse projeto é refazer a medida da circunferência da Terra, segundo procedimentos adotados por Eratóstenes na Antiguidade. Porém, desta vez, vocês contarão com o auxílio de ferramentas tecnológicas (SILVA; SOLTAU, 2014). Você propõe aos seus alunos realizar esse procedimento em conjunto com outra escola, de outra cidade. Várias cidades estão

envolvidas nesse grande projeto. Como escolher essa cidade para realizar o experimento? Que ferramentas tecnológicas utilizar? Quais serão os procedimentos principais para concluir essa experiência?

Resolução da situação-problema

Você poderia orientar os seus alunos a trabalharem em parceira com uma escola de outra cidade, mas que essa outra escola não poderia ser escolhida ao acaso. Após pesquisas históricas a respeito da experiência de Eratóstenes e, com o seu apoio e do professor de História, seus alunos concluíram que a outra escola deveria ser escolhida de maneira que esteja localizada em uma cidade de longitude aproximada à cidade da escola que estudam, porém, com latitudes distintas (SILVA; SOLTAU, 2014). Assim sendo, para escolher essa localidade, os alunos poderiam utilizar o software *Google Earth*, auxiliados pelo professor de Geografia.

Nessas duas cidades, no mesmo dia e horário, os alunos poderiam fixar verticalmente no solo varetas de comprimento conhecido e mediram a sombra projetadas por essas varetas. A partir das informações obtidas e recorrendo a cálculos matemáticos, com a ajuda do professor de Matemática, os alunos poderiam calcular a circunferência meridional da Terra, que é de, aproximadamente, 40.075 km.

A comunicação entre alunos das diferentes cidades poderia ser facilitada por meio de diferentes redes de comunicação via internet, como o *Facebook* e o *Skype*.

Faça valer a pena

1. Considerando as principais características dos modelos astronômicos elaborados na Antiguidade e na Idade Média, analise as afirmativas a seguir:

I. Segundo os gregos, o modelo de sistema astronômico consistia em: Terra, demais planetas, Sol e estrelas fixas em órbitas esféricas em torno da Lua.

II. Segundo o modelo ptolomaico, a Terra estaria no centro do Universo, e em torno dela estariam em órbitas descritas por meio de círculos os demais planetas.

III. Segundo o modelo copernicano, o Sol estaria em repouso no centro

do Universo, em que a Terra e os demais planetas estariam em órbita em torno do Sol.

Assinale a alternativa que apresenta a(s) afirmação(ões) correta(s):

a) Apenas I e II estão corretas.

b) Apenas I e III estão corretas.

c) Apenas II e III estão corretas.

d) Apenas II está correta.

e) As afirmativas I, II e III estão corretas.

2. Fundamentado nas ideias de Hiparco, considerado o pai da Astronomia, Ptolomeu formulou o seu modelo astronômico. A respeito desse modelo astronômico proposto por Ptolomeu, julgue cada uma das afirmativas a seguir como verdadeira (V) ou falsa (F):

( ) Segundo o modelo de Ptolomeu, o Sol giraria em torno da Terra, enquanto que todos os demais planetas conhecidos na época girariam em torno do Sol.

( ) O modelo astronômico de Ptolomeu propunha que a Terra seria o centro do Universo, enquanto que os demais astros girariam ao seu redor.

( ) O modelo astronômico de Ptolomeu era puramente geométrico e, assim, propunha um Universo relativamente simples, em que o Sol estaria no centro do Universo e o demais planetas girariam ao seu redor.

( ) O modelo astronômico proposto por Ptolomeu demandou um período muito longo para ser aceito, pois suas ideias contrariavam as defesas da Igreja Católica.

Assinale a alternativa que apresenta a relação correta de verdadeiros (V) e falsos (F), de cima para baixo:

a) V, V, V, F.

b) V, V, F, F.

c) F, F, V, V.

d) F, V, F, F.

e) V, F, F, V.

3. Diversas foram as concepções a respeito do Universo desde a Antiguidade, sobre a posição e movimentação dos astros e, sobretudo, a respeito de qual seria exatamente a posição da Terra em relação aos demais planetas e astros no Universo. Tais diversidades de concepções conduziram à elaboração de diferentes modelos astronômicos.

Sobre essa abordagem, faça a relação correta:

1. Ptolomeu.

2. Copérnico.

( ) Em seu modelo cosmológico, a Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno giravam ao redor da Terra, nessa ordem.

( ) Em seu modelo, cada planeta teria um epiciclo próprio. O centro de cada epiciclo se moveria em um ciclo maior, um pouco afastado da Terra.

( ) Em seu modelo cosmológico os planetas giram em torno do Sol.

( ) Em seu modelo cosmológico, o movimento retrógrado dos planetas é explicado pelo movimento da Terra.

Assinale a alternativa correta que apresenta a relação correta, de cima para baixo:

a) 1, 2, 2, 2.

b) 2, 1, 2, 2.

c) 1, 1, 2, 2.

d) 2, 2, 1, 1.

e) 1, 1, 2, 1.

Referências

ARAGÃO, M. J. **História da Física**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para universitários**. São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2012.

BOCAYUVA, I. Parmênides e Heráclito: diferença e sintonia. **KRITERION**, Belo Horizonte, n. 122, 2010, p. 399-412.

BRENNAM, R. P. **Gigantes da física**: uma história da física moderna através de oito biografias. 1. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

CARDOSO, H. B.; et al. Arquimedes e a lei da alavanca: erros conceituais em livros didáticos. **Caderno Brasileiro Ensino de Física**, v. 23, n. 2, p. 218-237, 2006.

CHERMAN, A. **Sobre os ombros de gigantes**: uma história da Física. 2. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2005.

DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V. **Física, 1**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

GUAYDIER, P. **História da Física**. Lisboa: Edições 70, 1983.

KOYRÉ, A. **Estudos galilaicos.** Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1986. p. 22-23.

LA COTARDIÈRE, P. **História das ciências**: da antiguidade aos nossos dias. v.1. Lisboa: Edições Texto & Grafia, 2010.

LOCQUENEUX, R. **História da Física**. Portugal: Publicações Europa-Americana, 1989.

MAGNAGHI, C. P. **Análise e tradução comentada da obra de Arquimedes intitulada "Método sobre os Teoremas Mecânicos"**. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física 'Gleb Wataghin', Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PEDUZZI, L. O. Q. Física Aristotélica: por que não considerá-la no ensino da Mecânica? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Santa Catarina, v. 13, n. 1, p.48-63, 1996. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7078/6549>. Acesso em: 21 mar. 2018.

PIRES, A. S. T. **Evolução das ideias da Física**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

ROONEY, A. **A história da Física**. São Paulo: M. Books do Brasil, 2013.

SILVA, J. S.; SOLTAU, S. B. Medindo o planeta Terra: um experimento com abordagem interdisciplinar. **E-xacta**, v. 7, n. 1, p. 35-44, 2014. Disponível em: <http://revistas.unibh.br/index.php/dcet/article/viewFile/1060/667>. Acesso em: 21 abr. 2018.

PIRES, A. S. T. **Evolução das ideias da Física**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

ROONEY, A. A história da Física. São Paulo: M. Books do Brasil, 2013.

SILVA, J. S.; SOLTAU, S. B. Medindo o planeta Terra: um experimento com abordagem interdisciplinar. **E-xacta**, v.7, n.1, p. 35-44, 2014. Disponível em: <http://revistas.unibh.br/index.php/dcet/article/viewFile/1060/667>. Acesso em: 21 abr. 2018.

A Revolução Científica

Convite ao estudo

A História da Física traça a trajetória de tentativas diversas da humanidade em compreender a natureza e os fenômenos naturais, sendo essas compreensões circunstanciadas pelo contexto social, cultural e econômico de cada época e de cada civilização. Pense em toda a tecnologia à sua volta: elas seriam possíveis sem toda a compreensão de mundo construída até agora? Por exemplo, as tecnologias via satélite seriam possíveis sem a compreensão do Universo? E será que existe algum método para adquirir, organizar e aplicar os conhecimentos historicamente construídos?

São esses os tipos de reflexões que você pode promover em sua futura prática docente. E, para isso, convidamos você a viajar para um período histórico rico em contribuições para a área da Física, marcada por uma revolução científica. A partir dos estudos que serão propostos, espero que você conheça e compreenda o método científico e seus fatos históricos relevantes, de modo que estes venham a contribuir com seu futuro profissional, enriquecendo suas práticas educativas com foco no desenvolvimento da curiosidade e conhecimento cultural. Com isso, até o final dessa unidade, você será capaz de demonstrar compreensão e saber aplicar os conhecimentos da história antiga da Física nas simulações e nas atividades da prática educativa para despertar a curiosidade e o conhecimento cultural no processo de ensino-aprendizagem.

Em direcionamento a esses objetivos, durante esta unidade, você se colocará no lugar de um professor de Física que leciona para as turmas de 1º e 2º ano do Ensino Médio de uma escola pública e que desenvolverá um projeto de divulgação

da História da Física por meio de redes sociais, utilizando como ferramenta os próprios celulares dos alunos e os computadores com internet disponíveis na escola. Para isso, você dividirá sua turma em três grandes grupos que devem contemplar os diferentes aspectos da Física em seus projetos. Suas turmas de 1º ano são maiores em número de alunos e, com isso, você vê a oportunidade de gerar dois grandes grupos, um que focará em abordagens relacionadas à Astronomia (primeiro grupo) e, o outro, à Mecânica (segundo grupo). Já as turmas de 2º ano devem desenvolver o projeto focando nas abordagens relativas à Óptica (terceiro grupo). Em cada projeto, além de aspectos históricos da Física, deverão ser apresentados resultados de pesquisas, cronologias, maquetes, diagramas, figuras ilustrativas e/ou vídeos didáticos a serem postados nas redes sociais. Que conhecimentos serão necessários aos seus alunos para realizar as atividades propostas nesse projeto? Como você orientará seus alunos desde a realização de pesquisas até a conclusão dessas atividades? Que discussões e reflexões a respeito das abordagens históricas e conceituais envolvidas nessas atividades você poderá promover junto aos seus alunos?

Para te auxiliar na condução desse projeto, nesta unidade, você conhecerá o método científico e sua importância para o período conhecido como Revolução Científica, bem como as principais descobertas que ocorreram nesse período, em que enfatizamos as teorias astronômicas e as principais contribuições de Isaac Newton para a Mecânica e para a Óptica. Além de suas contribuições, apresentamos outros grandes nomes, como Galileu, Kepler, Descartes, entre outros, cujas descobertas muito influenciaram as famosas teorias formuladas por Newton. Além disso, no campo da Óptica, também destacamos os trabalhos de Huygens que, de certa forma, apresenta uma teoria contraditória à de Newton sobre a luz, porém, ambas foram essenciais para a evolução dos conhecimentos nessa área.

Está preparado para ser inserido nessa época brilhante para o conhecimento científico? Então, bons estudos!

Seção 2.1

O renascimento científico

Diálogo aberto

Você já deve ter assistido a filmes e documentários envolvendo cientistas ou já deve ter tido alguma experiência em laboratório durante suas aulas de Física. Nesses contextos, há, em princípio, uma questão a ser respondida ou um problema a ser resolvido, para os quais são formuladas algumas hipóteses. Na sequência, procedimentos são seguidos com o objetivo de explicar e/ou responder aos questionamentos iniciais. Considerando esses contextos, você consegue ter alguma ideia do que seria o método científico? Consegue imaginar por que esse método marcou uma época importante para a Física?

Considerando a importância de se conhecer os principais estudos desenvolvidos no período da Revolução Científica (século XVII), você, um professor de Física do Ensino Médio, desenvolverá um projeto de divulgação da História das Ciências por meio de redes sociais e, para isso, organizou seus alunos em três grandes grupos a fim de realizar atividades distintas relacionadas a esse período. Você propôs ao primeiro grupo de alunos a realização de um projeto focado no renascimento científico, e tem como principal objetivo a construção e apresentação de uma maquete com a temática da evolução da Astronomia, sendo tal trabalhado divulgado por meio do *Facebook*. Que conhecimentos serão necessários aos seus alunos para construir essa maquete? Como você orientará seus alunos desde a realização de pesquisas até a conclusão dessa atividade? Que discussões e reflexões a respeito das abordagens históricas e conceituais envolvidas nessa atividade você poderá promover junto aos alunos?

Para que você possa orientar seus alunos nesse projeto, você precisará, primeiro, conhecer as principais ideias relacionadas às evoluções do conhecimento astronômico e o conflito dessas ideias com aquelas anteriormente estabelecidas, bem como conhecer os fatos mais marcantes do período considerado como Revolução

Científica, enfatizando o nascimento do método científico. São exatamente esses conhecimentos que são propostos nesta seção: defesas de que a Terra seria o centro do Universo, ou de que o Sol seria o centro, bem como ideias a respeito da posição e do movimento de corpos celestes.

Apesar de muitas dessas ideias terem sido pautadas em observações possíveis para cada época, havia muito misticismo e crença em autoridades religiosas subjacentes. A ciência moderna também é baseada na observação, porém, contempla método científico fundamentado no pensamento racional, na lógica e na experimentação. Esse método é caracterizado como um conjunto de procedimentos por meio dos quais busca-se propor um conjunto de explicações para determinados fenômenos.

Que tal iniciar esses estudos já pensando nas possíveis orientações que você poderá fornecer aos seus alunos na elaboração dessa parte do projeto?

Não pode faltar

Temendo o poder de líderes religiosos de sua época, bem como a prisão domiciliar ou a repreensão pública, Nicolau Copérnico (1473-1543), um dos grandes nomes da Astronomia, publicou suas ideias a respeito do Universo apenas no ano de sua morte. Ele propôs uma cosmologia Heliocêntrica, com o Sol no centro do Sistema Solar e a Terra girando ao redor do sol e ao redor de seu próprio eixo, explicando, assim, a alternância dos dias e das noites e o movimento retrógrado dos planetas com grande precisão. Sua publicação foi desprezada naquela época devido ao radicalismo de suas ideias. Vale ressaltar que, naquele período, havia um problema da intolerância ao pensamento livre, fosse por parte de religiosos ou não.

Giordano Bruno (1548-1600) foi um dos primeiros a defender publicamente as concepções de Copérnico. Ele também defendeu que cada estrela no céu seria um sol, que poderia abrigar planetas e vida a seu redor. Com relação à Mecânica, um ponto interessante é que ele resolve a questão da "pedra lançada para cima não cair no mesmo lugar" caso a Terra se mova, fornecendo um exemplo com a visualização de um objeto caindo no interior de um navio

conforme observado por alguém fora do navio. Ele cai em linha reta para quem o soltou no navio, mas se move com o navio para quem observa de fora. Então, ele argumenta que a Terra tem liberdade para se mover, pois o seu movimento está de alguma maneira impresso nos objetos que estão sobre ela.

Em síntese, Giordano Bruno foi quem refutou com observações empíricas um argumento importante dos opositores da teoria de Copérnico e cujos argumentos constam na obra *La Cena de le Ceneri*. Giordano Bruno foi condenado à morte na fogueira em Roma, no período de Inquisição, devido a suas defesas.

Além de Giordano Bruno, dois jovens astrônomos se converteram às concepções de Copérnico: o alemão Johannes Kepler (1571-1630) e o italiano Galileu Galilei (1564-1642).

Kepler tinha uma mente muito precisa e rejeitava toda e qualquer hipótese que não descrevesse perfeitamente a observação. Ele era incansável em seus cálculos e, em uma carta, ele admite que repetia ao menos 70 vezes cada um de seus cálculos (DUGAS, 1958).

Por volta de 1600, Kepler começou a trabalhar junto com Tycho Brahe (1546-1601), de quem herdou "um vasto conjunto de observações astronômicas de uma precisão sem precedentes" (BRENNAN, 2000, p. 15). Mas, antes disso, Kepler já tinha um certo reconhecimento entre aqueles que se interessavam por seu campo de estudos, sobretudo graças à sua publicação de 1596, do *Mysterium Cosmographicum*, em que já manifestava, de certo modo, suas convicções a respeito das ideias de Copérnico (LA COTARDIÈRE, 2010).

Foi a partir dos materiais herdados de Tycho Brahe que Kepler evidenciou falhas no modelo copernicano, o que o conduziu à rejeição dos movimentos circulares uniformes dos planetas. Kepler dedicou cerca de dez anos de sua vida a investigar empiricamente e matematicamente os movimentos que não se ajustavam à teoria copernicana. Naquele período, ele descobriu que a órbita da Terra em torno do Sol não era circular, mas elíptica. Tal descoberta teve como ponto de partida os estudos da trajetória de Marte em relação posicional à Terra e ao Sol. Em 1616, por culpa de um desvio ínfimo entre a previsão teórica de Copérnico e os dados de Tycho Brahe na trajetória do planeta Marte, Kepler foi obrigado a abandonar o círculo como a forma da trajetória do planeta, deixando para trás

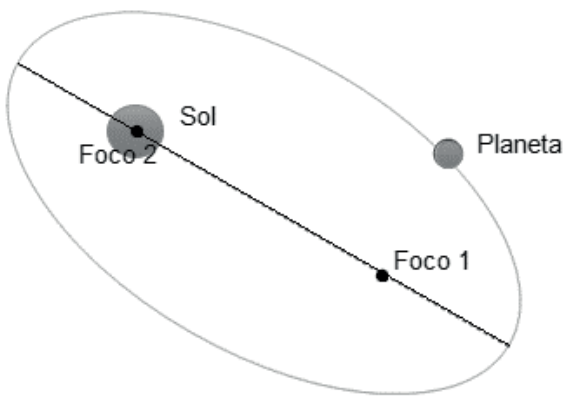
suas próprias crenças pessoais no processo. Logo, seus estudos se estenderam aos demais planetas.

Além de ser atribuído à Kepler o abandono da concepção de que o movimento dos planetas seria circular uniforme, deve-se a ele as primeiras evidências de preocupação constante em verificar hipóteses de maneira concordante às observações realizadas, associando teorias aos fatos, duas componentes características do método científico (LA COTARDIÈRE, 2010).

Em 1609, Kepler inaugurou o estudo da dinâmica dos planetas, apresentando duas leis do movimento planetário, que foram publicadas na sua obra *Nova Astronomia* (CHERMAN, 2005):

1ª Lei – *Lei das órbitas:* as órbitas dos planetas ocorrem em forma elíptica em torno do Sol, o qual está localizado em um dos pontos focais da elipse.

Figura 2.1 | Ilustração da 1ª Lei de Kepler

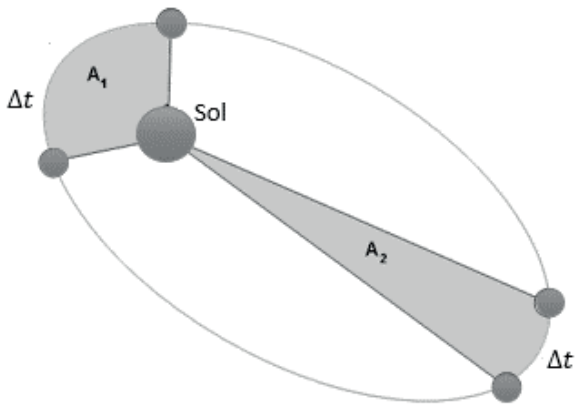


Fonte: elaborada pela autora.

A elipse é um tipo de secção cônica que tem dois focos. Denomina-se de eixo maior o segmento de reta que passa pelos dois focos, e denomina-se de eixo menor o segmento de reta que passa pelo ponto médio do eixo maior e é perpendicular a ele. Uma propriedade importante da elipse é sua excentricidade, caracterizando-a com mais achatada ou mais próxima de uma circunferência.

2ª Lei – *Lei das áreas:* um planeta percorre áreas ($A_1 = A_2$) iguais em tempos iguais ($\Delta t = \Delta t_1 = \Delta t_2$) e, portanto, o planeta apresenta um movimento mais rápido quando está mais próximo do Sol, e mais lento quando afastado dele.

Figura 2.2 | Ilustração da 2ª Lei de Kepler



Fonte: elaborada pela autora.

Em tempos iguais, temos áreas iguais e, se as áreas forem diferentes, a seguinte expressão matemática é respeitada:

$$\frac{A_1}{\Delta t} = \frac{A_2}{\Delta t}$$

Apenas em 1619, a terceira lei de Kepler foi publicada na obra intitulada *Acerca das harmonias celestes* (CHERMAN, 2005):

3ª Lei – *Lei dos períodos:* o cubo da distância média (*d*) entre um planeta e o Sol é proporcional ao quadrado do período (*T*) que ele leva para completar uma órbita em torno do Sol.

Segundo essa terceira lei, "se a distância média entre o Sol e qualquer planeta fosse elevada ao cubo e se o tempo que esse mesmo planeta leva para completar uma órbita fosse elevado ao quadrado, a razão dos dois números resultantes seria sempre a mesma" (BRENNAN, 2000, p. 16), independentemente do planeta envolvido, como na descrição matemática:

$$T^2 = k \cdot d^3$$

Onde k = constante de proporcionalidade. Na Mecânica Newtoniana obteremos:

$$k = \frac{4\pi^2}{GM}$$

Onde, M é a massa do Sol. Essa é a lei que prevê que a razão $\frac{T^2}{d_3}$

tem praticamente o mesmo valor para todas as órbitas em torno de um mesmo corpo de grande massa M (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Exemplificando

Em sala de aula, o professor pode utilizar regra de três (proporcionalidade direta) para determinar a constante de proporcionalidade. Para isso, ele pode considerar a razão entre o quadrado do período de revolução de um planeta em torno do Sol pela distância média ao cubo entre ele e o Sol, e uma outra razão entre o quadrado do período de revolução de um segundo planeta em torno do Sol pela distância média ao cubo entre ele e o Sol, cujas informações poderão ser obtidas na *Internet*. A expressão matemática será realizada da seguinte forma:

$$\frac{T_1^2}{d_1^3} = \frac{T_2^2}{d_2^3}$$

Contudo, é importante ressaltar que atualmente sabe-se que essa lei não é válida com tanta precisão, pois o número não é exatamente constante entre um planeta e outro, mas varia levemente (CHERMAN, 2005).

Kepler faleceu na Alemanha, em 1630, e é considerado o pai da mecânica celeste. Seus trabalhos foram, mais tarde, retomados por Isaac Newton (1643-1727), fundamentando seus tratados a respeito da Lei da Gravitação Universal (CHERMAN, 2005).

Vale lembrar que, naquele período, Leonardo Da Vinci (1452-1519) era um inventor e não exatamente um cientista e, portanto, não se preocupava em sistematizar suas intuições, estudou e discorreu sobre os mais diversos assuntos, como a Mecânica, Hidrostática, Óptica, entre outros. E utilizou tudo isso em conjunto com sua

inesgotável criatividade para criar seus famosos mecanismos. Considerando a Revolução Científica, Leonardo não tinha medo de corrigir suas ideias quando elas eram superadas pelas evidências. Ele tinha uma mente muito flexível e brilhante e, com certeza, merece ser lembrando com um nome importante para a História da Física.

Entre os defensores de concepções copernicanas, outro nome que se destaca é o de Galileu Galilei (1564-1642). Aproximadamente na mesma época em que Kepler publicava seus tratados a respeito do movimento planetário, Galileu observava os céus de Pádua, na Itália, utilizando o telescópio que aperfeiçoou em 1609. Mas, muito além de observar os céus, Galileu também se dedicou a experimentações diversas e a estudos relativos a tempo, distância, velocidade, aceleração, entre outros.

Enquanto na antiguidade os aristotélicos defendiam a existência de essências, a ideia de causas finais e de modelos geométricos fixos para explicar o Universo, Galileu buscava associar teorias com fatos observados e descrever matematicamente os resultados obtidos.

Por incrível que pareça, os experimentos realizados por Galileu eram bastante simples e partiu de problemas aparentemente triviais. Inclusive, a linguagem que adotava em boa parte de seus trabalhos divulgados era de fácil entendimento até mesmo por aqueles que não pertenciam às áreas de seus estudos. Dentre esses experimentos, podemos citar as observações de oscilações de pêndulos ou de objetos de diferentes pesos rolando por um plano inclinado.

Vale ressaltar que, Galileu trabalhou com planos inclinados e movimentos simples porque foi o primeiro a fazê-lo com linguagem matemática, realmente medindo tempos com instrumentos de medida (pêndulos, relógios de água e ampulhetas). Ele também propôs seu princípio da relatividade, indicando que não existe movimento absoluto na natureza, mas que o movimento depende do referencial. A relatividade de Einstein é uma evolução da relatividade de Galileu!

Além de tudo isso, a descrição matemática de velocidade e aceleração que utilizamos hoje deve muito a ele, assim como o conceito de aceleração constante na queda livre. Logo, qualquer elogio atribuído a Galileu é pouco perto de sua importância. O desenvolvimento do método científico, sobretudo, deve muito a ele.

Nos experimentos envolvendo o plano inclinado, Galileu lustrava as tábuas utilizadas visando minimizar os efeitos do atrito, e realizava experimentações com diferentes inclinações. Foi a partir desses experimentos com plano inclinado que ele chegou a conjecturar resultados para um experimento hipotético mental a respeito de queda livre de objetos (BRENNAN, 2000).

Há uma história interessante de que Galileu, do alto da Torre de Pisa, deixou cair, ao mesmo tempo, objetos de diferentes pesos para, com isso, demonstrar que esses objetos cairiam ao mesmo tempo no solo. Entretanto, essa história não passa de mito, mas ele certamente fez um experimento parecido para concluir o fato.

Reflita

Suponha que Galileu de fato tivesse realizado o experimento de abandonar corpos de pesos diferentes, ao mesmo tempo, do alto da Torre de Pisa. Os resultados presumidos de que tais objetos chegariam ao solo ao mesmo tempo seriam verificados? É possível estabelecer alguma relação entre esse experimento com as ideias aristotélicas a respeito de queda de corpos?

Sobre a queda livre de corpos, Galileu observou que, ao longo do tempo, o corpo cai cada vez mais depressa. Com essa observação, ele chegou a formular suas ideias a respeito de aceleração constante e de velocidade. Conjecturou, ainda, que, independentemente do tamanho e do peso do objeto em queda livre, a taxa de aumento da velocidade será a mesma, o que o conduziu a formular a *Lei da Queda dos Corpos*, a qual mais tarde fundamentou os estudos de Isaac Newton sobre Mecânica (BRENNAN, 2000).

Pesquise mais

Acesse o link indicado a seguir e saiba mais sobre a história dos experimentos com plano inclinado realizados por Galileu. Da página 228 até 230, você poderá refletir a respeito da relação entre esses experimentos de Galileu com algumas ideias aristotélicas. Na sequência, da página 230 até 234, você conhecerá os experimentos

realizados por Galileu segundo descrito em sua própria obra, intitulada *Duas Novas Ciências*:

Disponível em: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen7/ART11_Vol7_N1.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2018.

No campo da Astronomia, utilizando telescópios aperfeiçoados por ele mesmo, Galileu fez grandes descobertas. Sobretudo em determinadas semanas, em 1609 e 1610, o que Galileu observou serviu como evidência para corroborar com defesas de Copérnico e conflitar com as defesas de Ptolomeu a respeito do Universo. Ele observou, por exemplo, que a superfície da Lua não é perfeitamente esférica e uniforme, mas cheia de cavidades e proeminências, contendo crateras e montanhas, assim como a Terra. Com o telescópio foi possível observar, ainda, a Via Láctea com maiores detalhes, evidenciando que ela é composta por milhares de tênues estrelas, e que o céu é composto por uma infinidade de estrelas não visíveis a olho nu.

Galileu também fez a descoberta de quatro luas (que inicialmente ele considerou como planetas) que giram ao redor de Júpiter, refutando de vez as ideias aristotélicas de que a Terra seria o centro do Universo, ao redor da qual tudo o que existe no Universo estaria em revolução.

Outras descobertas de Galileu foram as manchas solares, que corroboraram com a ideia de que, assim como a Lua, o Sol também não seria uma esfera perfeita.

Em uma de suas maiores obras, o *Diálogo Sobre os Dois Grandes Sistemas Universais*, publicado em 1632, Galileu apresenta argumentos relativos às suas observações que mais se aproximam de hipóteses autoevidentes do que de observações de fato realizadas por ele. Nessa obra, ele retoma discussões das teorias geocêntrica e heliocêntrica em um tom de "zombaria" (BRENNAN, 2000), no qual ficam claras as concepções de Galileu a favor do modelo copernicano. Contudo, seus argumentos não foram o suficiente para provocar uma rápida e total aceitação da teoria copernicana, uma vez que isso impactaria na violação de muitas das ideias e doutrinas teológicas que muitos acreditavam até então. Sua obra

intrigou, sobretudo, a Igreja, que ainda exercia forte poder nessa época, uma vez que as ideias defendidas por Galileu contradiziam diversas das afirmações teológicas que defendiam.

Assim, Galileu foi acusado de heresia perante à Inquisição. Em 1616, as obras de Galileu já haviam sido proibidas e suspensas pela Igreja por apresentarem ideias contrárias às afirmações da Bíblia, contudo, em 1623, quando um amigo de Galileu assumiu o papado (Papa Urbano VIII), Galileu retomou suas obras. Contudo, com a publicação de *Diálogo Sobre os Dois Grandes Sistemas Universais*, em 1632, surgiram aqueles que julgavam que Galileu estava ignorando os avisos de 1616.

Mesmo com a idade bastante avançada, Galileu foi ameaçado de tortura e foi condenado à prisão domiciliar pelo resto de sua vida e, durante esse tempo, nenhuma de suas obras puderam ser publicadas.

Logo após a morte de Galileu (1642), nasceu Isaac Newton (1643), o qual, alguns anos mais tarde, viria a unificar de maneira brilhante os trabalhos de Copérnico, Kepler e Galileu.

Pesquise mais

Acessando o link indicado a seguir você conhecerá um pouco mais sobre Galileu e poderá visualizar algumas imagens que ilustram as observações feitas por ele a respeito das imperfeições do Sol e da Lua, das luas de Júpiter, entre outras observações:

Disponível em: <http://www.ccvalg.pt/astronomia/historia/galileu_galilei.htm>. Acesso em: 29 abr. 2018.

A Revolução Científica

O século XVII é considerado como aquele em que grandes mudanças aconteceram em relação à produção do conhecimento científico, sendo marcado pelo o que é chamado de Revolução Científica, em que a observação e a experimentação são suas características. Ressaltarmos que, ainda que o século XVII seja considerado como o que ocorreu a Revolução Científica, esta não ocorreu de repente e fez parte de um processo de diversas mudanças políticas, religiosas e culturais.

Roger Bacon (1561-1626) já propunha uma nova abordagem científica, preconizando observações e experimentações, renunciando às obras de Aristóteles. Em 1621, ele publicou a obra O *Novo Órganon das Ciências*, em que já deixava claro que resultados experimentais contribuem com o discernimento a respeito de teorias conflitantes, auxiliando a humanidade a se aproximar da verdade (ROONEY, 2013). Como defensor do raciocínio indutivo, Bacon instaurou o seguinte processo para o pensamento científico: observação, experimentação, análise e raciocínio indutivo. Esse processo pode ser entendido como o início do método científico moderno, que contempla o enunciado de um problema ou questionamento, o enunciado de hipóteses, concepção experimental para teste da(s) hipótese(s), execução do experimento e registro das observações, análise dos dados obtidos e apresentação das conclusões, as quais são submetidas à avaliação por pares.

Porém, o nome de maior destaque para a Física durante a Revolução Científica é, de fato, o de Galileu e, portanto, "sobre o ombro desse gigante", no final do século XVII, Newton completou suas teorias e de outros grandes nomes da Física que o antecederam. Galileu já adotava uma abordagem semelhante ao método científico em seus estudos, pois era proponente do raciocínio indutivo e valorizava abordagens experimentais.

Acredita-se, ainda, que a Revolução Científica tenha sido iniciada muito antes, afinal, foi Copérnico quem elaborou um sistema detalhado em termos matemáticos para demonstrar e sustentar suas concepções.

É no século XVII que cresce o interesse pela ciência, o que dá origem ao surgimento de sociedades científicas, primeiramente na Europa. Tais sociedades deram encaminhamento a discussões, experimentações e desenvolvimentos científicos (ROONEY, 2013) e defendiam que nada poderia ser aceito com base em apenas palavras ou autoridade.

A maior das sociedades fundadas durante esse período foi a *Royal Society of London* (Sociedade Real de Londres, do inglês), fundada oficialmente em 1660. Dentre os membros mais conhecidos dessa sociedade no período de sua fundação temos Robert Boyle (1627-1691) e Robert Hooke (1635-1703).

René Descartes (1596-1650) é outro grande nome do período conhecido por Revolução Científica. Descartes é conhecido por sua obra *Discurso do Método*, é considerado como o pai da Geometria Analítica e foi um dos primeiros a enunciar, de certa forma, o princípio da Inércia (PIRES, 2011). Nessa obra, Descartes funda o racionalismo moderno, em que defende a necessidade de se duvidar sobre tudo aquilo que não é verdadeiramente evidente. Na obra, ele menciona também outros preceitos relacionados à verdade, tais como: a necessidade de dividir em parcelas as dificuldades que surgem ao se estudar um objeto, uma vez que essa divisão permitirá um melhor julgamento dos resultados; ordenar o pensamento do mais fácil para o mais difícil; e, sempre revisar todo o estudo, verificando se informações relevantes não foram omitidas (PIRES, 2011).

Assimile

Denomina-se por Revolução Científica o período marcado por mudanças históricas na forma de pensamento científico, envolvendo o raciocínio indutivo associado a formas empíricas de se constatar fatos.

Antes desse período, o conhecimento humano fundamentava-se a questões filosóficas e religiosas. A partir de Copérnico, mas, sobretudo a partir dos estudos de Bacon e Galileu, uma nova forma de pensar começa a ser instituída, tornando o conhecimento mais estruturado. Começa a ser constituído o **método científico**, entendido como um método eficaz para a aquisição, organização e aplicação de conhecimentos novos (HEWITT, 2008), o qual é baseado no pensamento racional e na experimentação.

Sem medo de errar

Para o desenvolvimento do projeto de divulgação da História da Ciência por meio de redes sociais, você orientou o primeiro grupo de alunos a construir e apresentar uma maquete que represente conceitos relacionados à evolução das ideias sobre Astronomia de modo que este pudesse ser divulgado via *Facebook*.

Como o interesse estava na abordagem histórica, você poderia ressaltar para os seus alunos que eles não poderiam deixar de

considerar os principais modelos astronômicos da História da Física até o século XVII. Assim, você poderia orientar os alunos a construírem uma maquete do Sistema Solar se valendo dos conhecimentos astronômicos que contemplam as leis de Kepler, sem deixar de mencionar, em algum momento da apresentação dessa maquete, os modelos de Sistema Solar antecessores.

Visto que os alunos deveriam considerar as contribuições de Kepler na construção da maquete, você poderia orientar os alunos a pedirem o auxílio do professor de Matemática para melhor compreenderem a forma elíptica e seus elementos, como o de focos de uma elipse e sua excentricidade. A ideia seria compreender as principais características e propriedades da elipse para construí-las utilizando dois pregos e um barbante, alterando o comprimento do mesmo.

Quanto à divulgação, os alunos poderiam dar a ideia de fazerem uma transmissão de vídeo ao vivo via *Facebook*, em que, nessa transmissão, eles explicariam, a partir de imagens, os modelos de Aristóteles, Ptolomeu e Copérnico, diferenciando-os do modelo segundo proposto por Kepler.

Com o auxílio da maquete, você poderia orientar os alunos a explicarem as três leis de Kepler e a enfatizar as órbitas elípticas de seu modelo de Sistema Solar.

Inclusive, os alunos poderiam aproveitar o auxílio do professor de Matemática para realizar os cálculos relativos à 2ª e 3ª Lei de Kepler e enunciar em linguagem mais simples, utilizando um discurso genuíno e coerente, para explicar tais leis, facilitando a compreensão daqueles alunos que acessaram o material divulgado. Para isso, você, enquanto professor, auxiliaria seus alunos nas pesquisas por informações necessárias de cada planeta em relação ao Sol para realizar esses cálculos e refletirem sobre a validade dessas leis.

Outra proposta de discussão e reflexão que poderia ser levantada é: de que maneira o trabalho de Kepler pode ser considerado como um exemplo de um "novo" conceito de modelo astronômico? E, a partir das abordagens históricas a respeito do desenvolvimento desse modelo e dos que o antecederam, seria possível refletir, também, se os trabalhos de Kepler podem ser caracterizados ou não como pertencentes à Revolução Científica, explorando mais a posição corajosa de Kepler de abandonar suas próprias crenças metafísicas

(ele relutou muito a abandonar a forma circular das trajetórias), bem como abordando que ele respeitava muito o trabalho de Ptolomeu e de Copérnico, mas sabia que com os dados de Tycho e sua própria persistência nos cálculos seria capaz de ir além.

Outro ponto que também valeria ser abordado na divulgação é a respeito da própria construção do material, de modo a buscar fazer alusão ao método científico, destacando suas características e pressupostos históricos. Assim, os alunos poderão apresentar quais foram as questões e/ou problemas levantados que os conduziram à construção da maquete, quais foram suas hipóteses, que consequências foram previstas tanto para o caso da hipótese ser verdadeira, quanto para o caso dela ser falsa, se essas consequências foram ou não evidenciadas a partir da realização do experimento e, por fim, formular leis mais simples que organize hipóteses, seus efeitos e os resultados experimentais (HEWITT, 2008), sem deixar de considerar as abordagens teóricas e históricas a respeito da abordagem proposta com a maquete.

Durante as transmissões ao vivo, outros alunos poderão participar dessas discussões por meio dos comentários que poderão escrever no *Facebook*.

Avançando na prática

O método científico em sala de aula

Descrição da situação-problema

Imagine que você é um professor de Física visando conduzir seus alunos do Ensino Médio à compreensão das etapas do método científico, você deseja propor um experimento bastante simples a respeito de queda livre, em que o foco não esteja no experimento, mas na compreensão do método científico. Como você poderá conduzir esse experimento, objetivando que seus alunos compreendam o método científico? Que discussões podem ser propostas de modo a auxiliar os seus alunos a compreenderem a importância desse método na História da Física, que fez com que o surgimento desse método marcasse uma época, conhecida por Revolução Científica?

Resolução da situação-problema

Considerando as abordagens históricas da Física a respeito das contribuições de Galileu para essa área de conhecimento que já foram trabalhadas com seus alunos, você poderia levar para a sala de aula uma pequena pedra e um pedaço de papel e mencionar que vocês observariam a queda livre desses dois objetos em duas situações: 1º) do papel e da pedra, ao mesmo tempo; e, 2°) do papel amassado (ficando do mesmo tamanho e peso similar ao da pedra) e da pedra, ao mesmo tempo. Antes de realizar o experimento, você poderia orientar os alunos a formularem problemas e/ou questões que poderiam responder a partir do que eles esperavam observar no experimento. Um dos questionamentos levantados foi "qual a influência do ar no movimento de queda livre dos corpos em cada uma das situações?". Para responder a esse questionamento, hipóteses foram levantadas, mas você poderia mencionar que, para respondê-la de maneira condizente às observações, seria necessário conhecer teorias e, portanto, seria necessário pesquisar. Assim, poderiam ser explorados assuntos como a observação de Galileu que indica que a queda se dá em movimento acelerado: que sua velocidade aumenta a uma taxa constante, em aproximadamente, $9,8\ m/s^2$.

Em seguida, você poderia propor a execução dos experimentos e ressaltar a importância de o mesmo experimento ser repetido algumas vezes, sempre anotando os resultados obtidos. Tais resultados poderiam ser registrados de diferentes formas (desenhos, esquemas, tabelas, entre outros). Após, os alunos poderiam ser convidados a divulgarem suas conclusões, compartilhando os resultados com os seus pares. Afinal, o método científico se constitui como um conjunto de regras básicas, que tem por intuito desenvolver a experiência a fim de produzir novos conceitos, corrige-los ou integrá-los a conhecimentos já existentes e, todo esse processo, precisa envolver a comunidade interessada à mesma abordagem.

Faça valer a pena

1. Kepler e Galileu certamente estão dentre os nomes dos grandes astrônomos de todos os tempos, cujos trabalhos foram tão valiosos que permitiram a Newton realizar suas grandes descobertas.

Considerando o contexto histórico a respeito das contribuições de Kepler e de Galileu para a Astronomia, analise as afirmativas a seguir:
I. Fundamentado nos trabalhos de Copérnico e de Tycho Brahe, Kepler defendeu o sistema heliocêntrico, cujas defesas se firmaram a partir das observações e descobertas realizadas a respeito do planeta Marte e sua trajetória.
II. Galileu Galilei foi condenado pela Igreja Católica a viver isolado pelo resto de sua vida, por ter sido acusado de herege ao defender que a Terra seria fixa e centralizada no Universo.
III. Kepler concordava com várias concepções de Copérnico, porém discordava com a afirmação de que as órbitas dos planetas seriam circulares em torno do Sol.
IV. Galileu foi um dos grandes nomes da Revolução Científica, pois ele buscou, durante seus estudos, associar um raciocínio indutivo aos fatos observados.

Assinale a alternativa que apresenta todas as afirmativas corretas:

a) I, II e III.
b) II e III.
c) I, III e IV.
d) I e IV.
e) II, III e IV.

2. Durante muitos anos, a Igreja não permitiu que os trabalhos de Galileu fossem divulgados, devido a muitas de suas afirmações contradizerem às concepções religiosas defendidas na época e aceitas como verdades incontestáveis.
Considerando a natureza investigativa de Galileu e suas concepções controversas às da Igreja, julgue cada uma das afirmativas a seguir como verdadeira (V) ou falsa (F):

( ) A natureza investigativa de Galileu rendeu-se ao poder argumentativo da Igreja, uma vez que seus próprios métodos de investigação confirmaram a evidenciação de equívocos em suas concepções astronômicas.
( ) A natureza investigativa de Galileu, fundamentada na observação, na experimentação e no raciocínio indutivo contradisseram as concepções medievais.
( ) Relacionado ao princípio da relatividade, Galileu afirmou que não há movimento absoluto, mas sempre o movimento depende do referencial que o observa.

( ) Com a dificuldade de divulgar seus trabalhos devido ao período de Inquisição Galileu foi levado a adotar pressupostos da filosofia medieval predominante a respeito da composição do Universo.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta, de cima para baixo:

a) V, V, F, F.
b) F, V, V, V.
c) F, V, F, F.
d) V, F, V, V.
e) F, V, V, F.

3. Leia o texto a seguir:
No final do século XVI e no século XVII, "grandes nomes da ciência começaram a desenvolver a sua atividade científica, através da observação, da experimentação e formulação de hipóteses, usando métodos em perfeita consonância com a prática atual" (ARAGÃO, 2006, p. 10).
Dentre esses grandes nomes, podemos incluir:

I. o de Copérnico, que foi um dos primeiros investigadores a adotar o método experimental nos seus trabalhos para explicar sua teoria geocêntrica;
II. o de Galileu, que introduziu o método experimental nas suas vastas investigações, atribuindo a estas objetividade e credibilidade;
III. o de Bacon, que se dedicou a estudos que envolveram a observação da natureza e a experimentação;
IV. o de Kepler, que aderiu à tradição medieval, atribuindo autoridade à sabedoria antiga, impulsionando o conhecimento científico para a investigação objetiva e incontestável.

Relacionando os nomes dos cientistas e seus feitos, assinale a alternativa que contempla corretamente os grandes nomes da Revolução Científica no início do século XVI:

a) I, II e III.
b) I, III e IV.
c) I, III e IV.
d) II e III.
e) II e IV.

Seção 2.2

Mecânica

Diálogo aberto

Você consegue pensar em situações em que está presente o conceito de movimento? Pessoas caminhando pelas ruas, veículos trafegando nas estradas, atletas correndo em provas esportivas podem ser alguns dos exemplos que você pode ter pensado. Mas, podemos ir muito além: astros girando em torno de outros astros no Universo, sangue correndo em nossas veias, partículas atingindo velocidades extraordinárias em aceleradores de partículas estão dentre muitos exemplos que podemos citar. Podemos imaginar, ainda, diversas situações cotidianas em que corpos não estão em movimento. O que é importante frisar que a capacidade de compreender a causa dos movimentos abriu as portas para os avanços tecnológicos dos últimos séculos.

Todos esses casos são estudados em Mecânica, a parte da Física que estuda o movimento e o repouso de corpos, e que é a mais antiga das partes dos estudos físicos. Afinal, desde a Antiguidade, o ser humano preocupa-se em explicar os fenômenos que ocorrem na natureza, como os movimentos. Aristóteles, Arquimedes, Ptolomeu, Copérnico, Galileu, Kepler, dentre muitos outros, dedicaram-se a explicar o movimento em diversos contextos. Nesta seção, você é convidado a conhecer as contribuições de um dos maiores nomes para os estudos de Mecânica e outras abordagens da Física e da Matemática: Isaac Newton.

Até o momento, você já estudou as contribuições de Galileu, Kepler, entre outros, para o conhecimento físico, bem como o quanto as ideias desses e de outros grandes estudiosos foram importantes para a época, que ficou conhecida como um período de Revolução Científica. Agora, você conhecerá o quanto esses estudos influenciaram as famosas descobertas de Isaac Newton, o qual os unificou em um único corpo teórico, ligando definitivamente a Mecânica e a Astronomia.

Para enriquecer seu aprendizado e, também sua futura prática docente, nesta seção, você assumirá o papel de um professor de Física do Ensino Médio que está mediando um projeto de divulgação da História das Ciências por meio de redes sociais. Seu novo desafio será orientar um segundo grupo de estudantes na elaboração do projeto que abordará assuntos relativos à Mecânica, "como conhecemos nos dias de hoje", destacando o desenvolvimento da "Dinâmica". Para esse projeto, os alunos sugeriram a elaboração de uma cronologia e um vídeo didático, que serão divulgados por meio de redes sociais como o *Facebook*, destacando os principais episódios da História da Física que contemplam o desenvolvimento da Mecânica.

Que conhecimentos serão necessários aos seus alunos para elaborar essa cronologia e vídeo didático? Como você mediará as pesquisas para a realização dessa atividade? Existe algum nome que mereça destaque nessa tarefa? Que discussões e reflexões a respeito das abordagens históricas e conceituais envolvidas nessa atividade você poderá promover junto aos seus alunos?

No intuito de lhe ajudar com esse desafio, nesta seção, você terá a oportunidade de conhecer a história de Isaac Newton, com ênfase em suas principais contribuições para a Mecânica. Além disso, você terá a oportunidade de verificar quais as influências da Física no desenvolvimento da Matemática, sobretudo do Cálculo, em que Newton fortemente forneceu contribuições, serviram para enriquecer os estudos na Física. Conhecerá, ainda, as principais e as mais famosas obras de Newton, os Principia, que revelam muitas de suas mais grandiosas descobertas, como as famosas três leis de Newton.

Está preparado para encarar esse desafio? Então, vamos começar!

Não pode faltar

Conhecido por ser um dos maiores nomes da História da Física, Isaac Newton (1642-1727), ficou famoso pelas suas contribuições à Física e à Matemática. Newton nasceu em Woolsthorpe, uma pequena cidade da Ingleterra.

Por volta dos 12 anos de idade, Newton ingressou em uma escola secundária em Grantham, na Inglaterra e, nesse período, ninguém

imaginava que um dia ele seria considerado como um gênio. Dentre as características das escolas secundárias da época podemos apontar os estudos bíblicos e os interesses por questões teológicas que perduraram por durante toda a vida desse cientista (BRENNAN, 2000). Entretanto, era a linguagem da ciência e da matemática que despertava de fato os interesses desse jovem.

Não tendo demonstrado muita aptidão para a agricultura, que era a atividade principal realizada por sua família, em 1661, aos 18 anos de idade, Newton ingressou no Trinity College, em Cambridge, onde seu mais influente mestre foi o professor Isaac Barrow (1630-1677).

Naquela época, Cambridge ainda apresentava a cosmovisão aristotélica de um mundo composto por quatro elementos e situado no centro do Universo (CHERMAN, 2005) e, portanto, a princípio Newton estudou pressupostos de Aristóteles e Platão. Contudo, o movimento conhecido como Revolução Científica já havia começado a ganhar espaço, com obras mais modernas sendo lançadas. Dessa forma, Newton logo começou a se interessar por conta própria pelas ideias de um sistema heliocêntrico do Universo, conforme exposto por Copérnico e Kepler, bem como pelas ideias de uma nova mecânica, fundamentada no novo princípio sobre a inércia, segundo Galileu. Apesar de todas essas ideias terem fornecido fortes subsídios para suas próprias conjecturas a respeito do Universo e da mecânica, foi a partir de seus estudos sobre as ideias de Descartes a respeito de uma matemática que associava geometria e álgebra (a Geometria Analítica), bem como suas defesas de que a realidade física seria totalmente composta por partículas de matéria em movimento e que "todos os fenômenos na natureza resultam de interações mecânicas das partículas" (BRENNAN, 2000, p. 25), que Newton se fundamentou para elaborar uma "nova matemática", que seria necessária à elaboração de suas teorias físicas, sobretudo para a formular as leis da gravitação universal.

Newton também sofreu forte influência das concepções de Francis Bacon (1561-1626) a respeito da abordagem científica embasada no raciocínio indutivo que este defendia. Em outras palavras, para Bacon a abordagem científica deveria partir de dados concretos, produtos de experimentos, a partir dos quais se deveria raciocinar indutivamente para se chegar a conclusões gerais. O

próprio Newton se pautou em importantes premissas, de acordo com o apresentado por Dugas (2011):

1- Não assumir para um fenômeno nenhuma causa além das necessárias para explica-lo completamente.

2- Relacionar o maior número possível de fenômenos com as mesmas causas, para explicá-los todos.

3- Estender para todos os corpos as conclusões obtidas por meio daqueles que podem ser testados experimentalmente.

4- Toda a proposição obtida através da indução é considerada válida até que novos fatos ou experimentos indiquem falhas na proposição ou mostrem seus os limites de validade.

Vale enfatizar que a ciência não traz verdades absolutas, mas todas as teorias devem resistir continuamente a novos experimentos e testes.

Contudo, não foi durante esse período inicial em que Newton estudou no Trinity College que ele demonstrou todo o seu potencial. Inclusive, em 1665, ele integralizou sua formação nessa instituição sem nenhum reconhecimento especial. Afinal, seus interesses e estudos independentes realizados nesse período foram registrados apenas em seus próprios cadernos, sem divulgação (BRENNAN, 2000).

No ano de 1665, quando se abateu na Inglaterra a temida peste negra, as universidades foram forçadas a fecharem as suas portas e, dessa forma, Newton não teve outra saída que não retornar à casa de sua família em Woolsthorpe. E, por incrível que apareça, foi nesse lugar que ele viveu seus *anni mirabiles* (anos milagrosos), em que novas e revolucionárias ideias foram criadas. Foi nesse período que Newton concebeu a maioria das ideias que viriam a compor a sua mais importante obra, os *Principia*.

Mas, antes de chegarmos à essa tão grandiosa obra, vamos retomar as concepções que fundamentaram suas descobertas. Galileu havia definido a lei dos corpos em queda, em que a posição varia com o quadrado do tempo decorrido, e também já havia mensurado com precisão a aceleração gravitacional ao nível do mar. Kepler havia descrito que os planetas realizariam órbitas elípticas e que seus cursos se deviam a uma influência do Sol. Kepler formulou, ainda, leis bastante precisas a respeito da cinemática dos planetas. Bacon havia defendido que a verdade

estaria no mundo natural e nas informações derivadas dele. Por fim, Descartes havia proposto métodos matemáticos diversos que poderiam ser aplicados à problemas físicos (BRENNAN, 2000). Todo esse conhecimento Newton já havia adquirido, o que lhe faltava era tempo para organizar todas essas ideias de modo a alimentar suas próprias conjecturas. E esse tempo, a peste negra o obrigou a ter. A matemática proposta por Descartes (a Geometria Analítica) foi, sem dúvidas, uma ferramenta de grande importância para estudos físicos, inclusive para o entendimento do Universo. Afinal, a possibilidade de representar uma equação num gráfico, ou seja, a possibilidade de transformar uma representação geométrica em algébrica tornou possível compreender diversos fenômenos estáticos. Galileu foi capaz de mostrar que a trajetória do lançamento oblíquo era uma parábola, e Kepler que o movimento dos planetas se dava em elipses. Graças à Geometria Analítica, que esclarece a relação entre as curvas cônicas, foi uma pista de que os movimentos poderiam estar relacionados. Unindo as descobertas de Galileu sobre a inércia e a aceleração, com a terceira lei de Kepler e a lei das áreas, além de seus próprios experimentos com pêndulos, Newton foi capaz de unir todos os conhecimentos prévios em um único corpo.

Como o Universo não é estático fazia-se necessário buscar um meio de matematizar um Universo dinâmico, ou seja, em constante movimento. É aqui que nasce o Cálculo Diferencial e Integral, um grande marco para a História da Matemática e que impactou profundamente a História da Física. Por meio do Cálculo Diferencial e Integral, possibilitou-se compreender e resolver problemas que envolvem variações infinitesimais em taxas de movimento e determinação de trajetórias de um corpo no espaço. Trata-se, portanto, de uma matemática que permite considerar problemas dinâmicos e flutuantes e, por esse motivo, Newton a chamou de método matemático de *fluxões* (BRENNAN, 2000). Contudo, vale esclarecer que o Cálculo já era discutido por outros grandes nomes, como Pierre de Fermat (1607-1665), e inclusive pelo mentor de Newton, Isaac Barrow. O papel de Newton foi na estruturação dos aspectos diferenciais do Cálculo. Além disso, o Cálculo infinitesimal foi um desenvolvimento posterior, Newton precisou dele para chegar à lei da gravitação universal, mas não para chegar às suas três importantes leis e, por isso, voltaremos a abordar o desenvolvimento do Cálculo mais adiante.

Sobre as ideias de Newton a respeito do movimento, existe uma famosa história de que, um dia, estando Newton debaixo de uma macieira no jardim da casa de sua família, a observação da queda de uma maçã foi o gatilho para a elaboração de sua teoria sobre a gravitação universal. Contudo, considerando o que se sabe sobre a personalidade de Newton e a falta de registros que comprovem a veracidade dessa história, é provável que ela não passe de uma lenda. Sendo verdadeira ou não essa história, sabe-se que foi em Woolsthorpe que Newton percebeu que a mesma força responsável pela queda de uma maçã (por exemplo) seria a responsável por mantar a Lua em sua órbita. Esta constatação marcou grandiosamente a história do pensamento humano!

Newton sabia que a atração gravitacional partia de todas as partículas, mas provou, por meio do Cálculo Integral, que o efeito seria idêntico a considerar toda a massa concentrada no centro. Newton comprovou, analisando as descobertas da aceleração da gravidade de Galileu, a terceira lei de Kepler, que a lei da gravitação é do tipo inverso do quadrado da distância, o que Hooke (1635-1703) já tinha proposto a mesma teoria algum tempo antes. Porém, foi Newton quem buscou a comprovação experimental analisando o movimento da lua e tentou quantificar a diferença entre a força gravitacional que a Terra exercia sobre a maçã e sobre a Lua. Para isso, Newton se fundamentou na terceira lei de Kepler, elaborando a *lei do inverso do quadrado*, em que defendia que a "força gravitacional diminui com o quadrado da distância sobre a qual se propaga" (BRENNAN, 2000, p. 28).

Com relação à queda da Lua, Newton possuía em mãos dados que não permitiram a comprovação imediata de que a queda da Lua teria a mesma origem do que a queda da maçã, mas após alguns anos ele recebeu dados mais precisos, que o permitiram comprovar a exatidão de sua suposição. Compondo a velocidade tangencial da lua ao redor da Terra com sua queda livre para a Terra, obtemos sua trajetória.

Tal concepção de Newton é considerado como uma descoberta grandiosa, pois foi ela que permitiu pressupor os mesmos princípios matemáticos para todos os corpos do Universo. Construiu-se, dessa forma, uma primeira visão moderna a respeito da mecânica de todos os corpos, aplicando mesmo princípios matemáticos para

descrever o movimento desde para as menores partículas, até para os maiores corpos celestes.

Apesar da grandiosidade de suas descobertas, Newton guardou todas elas para si mesmo. Em 1667, Newton retornou a Cambridge, onde logo assumiu o posto de sucessor do seu mentor Isaac Barrow. Contudo, Newton continuou a reservar para si suas descobertas por alguns anos.

Newton relutou em publicar suas descobertas e foi estimulado pelo jovem Halley (1656-1742), conhecido pela identificação de um cometa periódico que leva o seu nome, a prosseguir com a publicação. Intrigado por um problema de dinâmica orbital, em 1684, Halley visitou Newton. Antes dessa visita, Halley já havia entrado em contato com o arquiteto Christopher Wren (1632-1723) e o astrônomo Robert Hooke (1635-1703), porém estes não conseguiram auxiliá-lo com precisão. Halley queria saber se seria possível provar matematicamente que os planetas giravam em órbitas elípticas em torno do Sol, o que Newton já havia provado anos antes. Porém, ao solicitar os cálculos para Newton, este afirmou não conseguir encontrá-las, enviando-as à Halley apenas três meses após sua visita. Durante esse tempo, Newton escreveu um tratado de nove páginas, intitulado *De motu* (*Sobre o movimento dos corpos giratórios*), no qual, além da solução do problema apontado por Halley, Newton apresentava um tratado geral da Dinâmica. Nele, ainda não constavam a enunciação da lei da gravitação universal e nem as três famosas leis de Newton, mas foi uma importante obra que antecedeu seu maior trabalho, o *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (ou Princípios Matemáticos da Filosofia Natural), mais conhecido simplesmente como o Principia. É nessa obra que as leis de Newton estão enunciadas, assim como as leis da gravitação universal e muitas das provas construídas em uma forma geométrica do cálculo infinitesimal.

Halley reconheceu a grandiosidade dos trabalhos de Newton e imaginou que, dentre suas muitas anotações, Newton ainda teria muitas descobertas importantes para serem reveladas. Assim, Halley o convenceu a organizar seus trabalhos e, de 1684 a 1686, Newton se dedicou devotadamente ao seu mais importante trabalho, os *Principia*, em que sintetizou e revisou todos os trabalhos que havia realizado ao longo de 20 anos.

A publicação dessa obra ocorreu em 1687 e era composta por três livros. De maneira geral, no livro I, Newton expôs uma dinâmica geral dos corpos em uma situação teórica de inexistência de atrito ou qualquer resistência. No livro II, ele também se dedicou ao movimento dos corpos, porém considerando forças resistivas, em que afirmava que o movimento dos corpos sofreria uma resistência proporcional às suas velocidades. No livro III, Newton apresentou a descrição matemática para os movimentos dos corpos celestes, com base nas três leis do movimento que enunciou:

- **Primeira Lei:** "Se nenhuma força atua sobre um corpo, sua velocidade não pode mudar, ou seja, o corpo não pode sofrer aceleração", e "Se nenhuma força resultante atua sobre um corpo ($\vec{F}_{Res} = 0$), a velocidade não pode mudar, ou seja, o corpo não pode sofrer aceleração" (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2018, p. 98).

- **Segunda Lei:** "A força resultante que age sobre um corpo é igual ao produto da massa do corpo pela aceleração" (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2018, p. 99). Em termos matemáticos, temos:

$$\vec{F}_{Res} = m \cdot \vec{a}$$

- **Terceira Lei:** "Quando dois corpos interagem, as forças que cada corpo exerce sobre o outro são iguais em módulo e têm sentidos opostos" (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2018, p. 107). Em termos matemáticos, temos:

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

Onde as forças $\vec{F}_{AB}$ e $\vec{F}_{BA}$ têm mesmo módulo, mesma direção e sentidos opostos.

De maneira mais detalhada, os *Principia* podem ser divididos em seis partes. Na primeira, suas oito definições, dentre as quais destaca-se a primeira: enuncia que a quantidade de matéria é a medida de matéria originada da densidade e do volume conjuntamente, em que, de certa forma, Newton define "massa".

Assimile

Em sua mais famosa obra, os *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publicada em 1687, Newton mostrou que as leis físicas

que atuam na Terra são as mesmas que regem os astros. Também, nessa obra, ele enunciou suas três famosas leis da Mecânica. Assim, encontramos que, a partir da Lei do Quadrado Inverso da Distância, Newton calculou a força gravitacional e que ele verificou que as massas também influenciam a atração gravitacional.

Em 1713, a segunda edição de os *Principia* foi lançada e sua obra impactou não apenas os interessados por ciência na época, mas a mecânica newtoniana é considerada ainda hoje como estruturante da Física. E, diferente de seus antecessores, como Galileu e Copérnico, suas concepções não foram atacadas pela Igreja Católica, pois o ambiente científico era extremamente positivo na Inglaterra, a qual era mais aberta à ciência, com proteção e estímulo do estado (apoio à Royal Society).

Pesquise mais

Acessando o link abaixo você poderá conhecer à obra de Augusto J. S. Fitas, de 1996, intitulada *Os Principia de Newton*, alguns comentários (*Primeira parte, a Axiomática*), em que poderá conhecer melhor essa grandiosa obra de Isaac Newton.

Entre as páginas 04 a 10, você aprofundará seus conhecimentos sobre as três leis de Newton, segundo o *Principia* e, entre as páginas 37 a 43, aborda-se a respeito das concepções de Newton em relação às leis de Kepler e à gravidade. Disponível em: <http://home.uevora.pt/~afitas/Principia.pdf>. Acesso em: 6 mai. 2018.

Retomando as contribuições de Newton para o desenvolvimento do Cálculo, baseado em concepções de Descartes, ele acreditou que um problema muito vasto ou complicado deveria ser decomposto em problemas menores. E é mais ou menos isso que o Cálculo Diferencial e Integral faz: decompõem-se o problema de modo que, quanto mais decomposto, mais precisos serão os resultados.

Acredita-se que Newton, ao observar o movimento de um planeta, notou que o mesmo se movia de maneira que em cada ponto de

sua trajetória a direção da velocidade seria a mesma que a da reta tangente à trajetória naquele ponto. Desse modo, várias "pequenas tangentes" possibilitariam descrever o movimento dos planetas. O objetivo de Newton ao desenvolver o cálculo infinitesimal era provar que poderia descrever completamente a força entre dois corpos celestes considerando apenas a posição de seus centros de massa.

Ele desenvolveu o Cálculo para provar que a influência gravitacional de uma casca esférica de matéria ao redor de um ponto central é igual à influência gravitacional de toda essa massa concentrada no centro. Seus estudos e descobertas a respeito de séries infinitas também contribuíram muito para chegar à essas ideias que culminaram no desenvolvimento do Cálculo Diferencial e, mais adiante, do Integral.

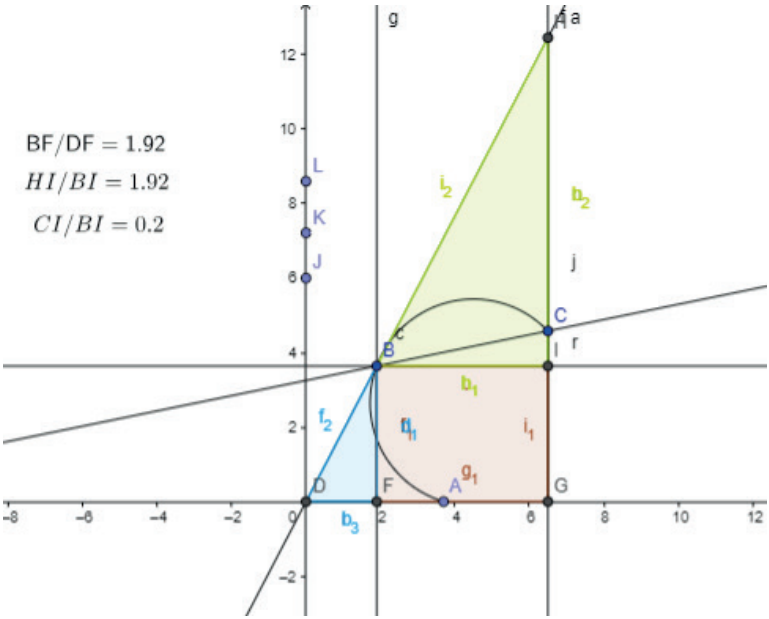
O método das *fluxões* de Newton, que podemos atualmente considerar como método das tangentes, foi desenvolvido a partir de suas ideias a respeito da natureza do movimento. Tal método "resolveu o problema da determinação do traçado da tangente a uma curva dada por uma equação $f(x,y) = 0$ onde as variáveis x e y representavam grandezas que "fluem" com o passar do tempo – os *fluentes* – e suas velocidades, chamadas de *fluxões*" (BRAGA, 2006, p.157). Os estudos de Newton abriram caminho para o cálculo infinitesimal, permitindo que sejam analisadas as taxas de variação de grandezas, relacionadas com a inclinação da reta tangente.

Exemplificando

Em sala de aula, no nível superior, é possível utilizar a História da Física e da Matemática, inclusive, o método de *fluxões* de Newton, para auxiliar na aprendizagem do Cálculo Diferencial. Afinal, seu método pode ser simulado facilmente utilizando recursos computacionais, como GeoGebra, que é um software de geometria dinâmica de acesso livre.

Em seu método, as *fluxões* (velocidades) assemelham-se aos aumentos dos *fluentes* (que são gerados em iguais intervalos de tempo), porém, são infinitesimais. Na Figura 2.3, a representação do método das fluxões de Newton por meio do *software* GeoGebra pode ser explorada para realizar uma abordagem histórica desse método de Newton:

Figura 2.3 | Interface do GeoGebra para exploração do Método das *Fluxões*



Fonte: <https://www.geogebra.org/m/EuJeacxn>. Acesso em: 6 maio 2018.

A leitura do texto indicado no link a seguir auxiliará na compreensão do método explorado pelo GeoGebra (ler páginas 176-181):

Disponível: <https://revistas.pucsp.br/index.php/IGISP/article/viewFile/8327/6706>. Acesso em: 1 jun. 2018.

O método matemático elaborado por Newton permitiu a análise de variações infinitesimais, que permitem, por exemplo, a determinação da área sob uma curva analisando o somatório da área de um número cada vez maior de retângulos, aumentando a precisão da estimativa, tal como ilustrado na Figura 2.5. Tratam-se das bases do Cálculo Integral:

Figura 2.4 | Método de Newton para determinação da área sob uma curva

Fonte: Brennan (2000, p. 27).

Reflita

Seria Newton a primeira pessoa a explorar o domínio dos infinitesimais para o cálculo de área sob curvas? Considere, por exemplo, as tentativas de quadratura do círculo na Grécia antiga, tal como ilustra a Figura 2.5 a seguir. Trata-se do método da exaustão de Arquimedes:

Figura 2.5 | Quadratura do círculo

Fonte: Cherman (2005, p. 45).

Que relação pode ser estabelecida entre essas tentativas dos gregos antigos com o método de Newton para determinação da área sob uma curva?

Independentemente de Newton, porém, mais ou menos no mesmo período, Gottfried Leibniz (1646-1716) também se dedicava às descobertas ao que hoje conhecemos por Cálculo Diferencial e Integral. Assim como Newton, Leibniz considerava que as ideias de quadraturas e tangentes estavam atreladas à ideia de quantidade infinitamente pequenas e evidenciava que um processo era o inverso do outro. Leibniz zelava por uma notação rigorosa, sendo atribuído a ele a notação de diferenciais, como o dx , por exemplo, e o símbolo utilizado para a integração ($\int$) (CHERMAN, 2005).

O alemão Gottfried Leibniz estabeleceu os fundamentos do Cálculo Integral e do Cálculo Diferencial de maneira independente à Newton. E, além de seus trabalhos relativos aos Cálculos, atribui-se a Leibniz o aperfeiçoamento da máquina de calcular inventada por Blaise Pascal (1623-1662), tornando-a capaz de multiplicar e dividir; desenvolveu e aperfeiçoou alguns dispositivos mecânicos, tais como, relógios e prensas hidráulicas; aperfeiçoou o sistema binário de numeração, o qual tem hoje grande utilidade em operações de computador; dentre muitos outros feitos.

A batalha travada entre esses dois gênios para provar quem foi o primeiro a inventar o Cálculo durou muito tempo, com acusações de plágio entre eles, porém, sabe-se que ambos desenvolveram seus trabalhos de maneira independente.

Em 1689, Newton passou a se dedicar à carreira política, sendo eleito para o Parlamento pela primeira vez. Em 1696, foi designado a assumir o cargo de administrador da Casa da Moeda de Londres e, em 1701, renunciou ao seu cargo na universidade de Cambridge. Em 1703, ele foi eleito presidente da Royal Society e, em 1705, foi nomeado pela rainha da Inglaterra, Anne, como Cavaleiro da Coroa, recebendo o título de Sir Isaac Newton. Portanto, até a sua morte em 1727, Newton recebeu grande destaque na sociedade por suas contribuições, e dedicou-se mais a atividades administrativas do que científicas.

Sem medo de errar

Na orientação do desenvolvimento de projetos de divulgação da História das Ciências por meio de redes sociais, você acompanhou o segundo grupo de estudantes na elaboração do projeto que abordará assuntos relativos à Mecânica, em que muito provavelmente poderão ser destacadas contribuições de Isaac Newton para essa área de estudos da Física.

Para esse projeto, os estudantes sugeriram elaborar uma cronologia que será apresentada no *Facebook* e *Instagram* e, depois, estenderiam essa cronologia por meio da elaboração de um vídeo didático que será disponibilizado no *Youtube*.

Para colocar em prática a elaboração proposta, você poderia instruir seus alunos a realizarem pesquisas a respeito da vida e das principais obras de Isaac Newton e, ainda auxiliá-los na seleção

dos principais episódios a serem considerados na cronologia, que deveria ser curta, mas objetiva em apresentar contextos históricos desse grande nome da Física associados à Mecânica.

Seus alunos poderiam ter dificuldades na seleção dos principais episódios em decorrência da não compreensão da extensão da ideia de "mecânica". Alguns alunos, por exemplo, poderiam mencionar que já ouviram falar de mecânica de automóveis, quando seus pais precisam consertar algo neles, associando, dessa forma, essa ideia à de estudo das máquinas, da sua construção e do seu funcionamento. Portanto, você, enquanto professor mediador precisaria buscar meios para que seus alunos percebam que a definição de "mecânica" para a Física tem um sentido muito mais amplo, sendo considerada como a ciência que tem por objeto o estudo das forças ou da sua ação, envolvendo, inclusive, a mecânica celeste, porém sem desmerecer os conhecimentos prévios manifestados por seus alunos que, no caso, não estariam incorretos, esclarecendo à eles a divisão da Mecânica em Cinemática e Dinâmica e, que Newton contribui fundamentalmente para a Dinâmica. Uma das formas que você poderia adotar seria orientá-los a buscar no dicionário e em livros de Física pela definição de Mecânica e o que nela se estuda.

Após estudo e esclarecimento, os alunos poderiam ter maior facilidade na seleção de episódios e, novamente mediados por você, poderiam selecionar cinco deles, que seriam o suficiente para montar a cronologia proposta. Os episódios selecionados poderiam ser:

- **1661:** Isaac Newton ingressou no Trinity College, em Cambridge, onde teve contato e se interessou pelas obras de Aristóteles, Platão, Copérnico, Galileu, Kepler, Bacon e Descartes, que subsidiaram suas futuras descobertas.

- **1665:** Isaac Newton retorna para sua casa onde se refugia durante o período em que a peste negra abateu sobre a Inglaterra. Esse período foi considerado como milagroso, pois foi o período mais fértil de ideias originais e revolucionárias da vida de Newton.

- **1667:** Isaac Newton retorna a Cambridge, ocupando o cargo de seu mestre, Isaac Barrow, retomando contatos com estudiosos de mesmas áreas de seus interesses.

- **1684:** Isaac Newton recebe a visita de Halley, que reconhece a grandiosidade de suas descobertas e o incentiva a organizar as ideias anotadas durante o período em que esteve de volta à sua casa.

- **1687:** É publicada pela primeira vez a sua maior obra, os *Principia*.

Essa cronologia poderia ser elaborada utilizando imagens e recursos computacionais que dinamizariam e tornariam mais atrativas as apresentações da cronologia. Porém, antes dos alunos prepararem o vídeo, você poderia mencionar que por se tratar de um vídeo com fins didáticos, ele deveria ser curto, objetivo e, atrativo.

Você poderia ainda orientar os alunos que dentre toda a biografia de Isaac Newton, os pontos de destaque para a apresentação no vídeo deveriam ser seu período mais genioso, que foi durante seu retorno à sua casa, destacando suas descobertas sobre a gravitação universal e três Leis de Newton, mas enfatizar, sobretudo, suas principais definições e demonstrações contidas na obra os *Principia*, destacando as três leis do movimento que foram enunciadas e a lei da gravitação universal.

Avançando na prática

História da Física e interpretação de textos

Descrição da situação-problema

Um dia, em uma aula de Física com sua turma de 1º ano do Ensino Médio, um aluno encontrou uma frase na *Internet* que achou bonita e quis levar para a aula, pois queria mostrar a você e aos demais colegas de sala e, além disso, estava inquieto ao não conseguir compreender tudo que a mesma descrevia e, assim, pediu sua interpretação da mesma. Com isso, você, professor de Física da turma, viu uma brecha para um trabalho interdisciplinar com o professor de Língua Portuguesa. A frase encontrada por ele foi: "Se enxerguei mais longe que outros homens, foi porque me ergui sobre ombros de gigantes" (NEWTON apud BRENNAN, 2000, p. 12). Para o trabalho interdisciplinar, você e o professor de Língua Portuguesa selecionaram outras frases para colocar em discussão, como: "Platão é meu amigo, Aristóteles é meu amigo, mas minha melhor amiga é a verdade" (NEWTON apud CHERMAN, 2005, p. 41).

Como poderia ser estruturado esse trabalho coletivo? Quais estratégias metodológicas você poderia utilizar para mostrar ao aluno relações entre essas frases a História da Física?

Resolução da situação-problema

Você poderia deixar os alunos divididos em pequenos grupos (de, no máximo, 3 alunos) discutindo as frases por 10 minutos. Na sequência, você poderia disponibilizar alguns materiais de consulta, como, por exemplo, revistas, jornais e livros que abordem a História da Física, ou façam menção a Newton. Após mais meia hora de pesquisas, alguns alunos poderiam manifestar seus entendimentos a respeito da frase.

Para a primeira frase, uma das ideias mais prováveis de serem manifestadas entre os alunos como interpretação é a que se refere ao reconhecimento de Newton de que todas as suas descobertas foram fundamentadas em grandes estudiosos que o precederam, como Descartes, Galileu, Kepler, entre outros.

Quanto à segunda frase, espera-se que a maioria dos alunos manifeste que ela faz menção aos estudos que Newton realizou em Cambridge sobre as teorias platônicas e aristotélicas consideradas na época, as quais não foram menosprezadas, ainda que tenha buscado, independentemente, por outros conhecimentos divergentes a essas teorias em diversos aspectos, e que, quando menciona que sua melhor amiga é a verdade, refere-se a Descartes e Bacon, no que diz respeito ao método indutivo para determinação da verdade.

Você poderia aproveitar esses momentos de discussões para estimular a reflexão sobre como Newton desenvolveu suas ideias, utilizando as duas frases para evidenciar que Newton não desprezou as contribuições de seus antecessores, mas testou tudo com seus experimentos com pêndulos e análise de dados astronômicos para selecionar cuidadosamente aqueles que traziam a verdade, não selecionando a sua verdade por afinidades ou argumentos de autoridade. Assim, ele estudou Platão, Aristóteles, Ptolomeu, Galileu e Kepler, e muitos outros, e compilou o sistema mais correto.

A partir dessas interpretações, você poderia avaliar as compreensões dos estudantes e, assim, verificar que pontos deveriam ser revisados ou aprofundados.

Faça valer a pena

1. Em 1686, Isaac Newton apresentou pela primeira vez suas famosas três leis que embasam a Mecânica Clássica. Essa apresentação foi realizada em sua mais famosa obra, os *Principia*. Com relação à apresentação dessas leis, podemos afirmar que:
I. Uma das consequências da primeira lei é o fato de que, se nenhuma força for aplicada a um corpo, então ele permanecerá em seu estado de movimento, seja de repouso ou de movimento retilíneo uniforme.
II. A segunda lei enunciada no *Principia* refere-se ao fato de que a aceleração de um corpo submetido a uma força resultante externa terá sempre uma relação de proporcionalidade direta com a massa desse corpo.
III. Na terceira lei enunciada por Newton em sua obra os *Principia*, faz-se menção ao fato de que a força é resultado da interação mútua entre dois corpos.

Considerando os enunciados das três leis de Newton nos *Principia*, assinale a alternativa correta:

a) As afirmativas I, II e III estão corretas.
b) Somente as afirmativas I e II estão corretas.
c) Somente as afirmativas I e III estão corretas.
d) Somente as afirmativas II e III estão corretas.
e) Somente a afirmativa I está correta.

2. Na época em que foi publicada a obra *Principia*, de Isaac Newton, poucos estavam preparados para compreendê-la. Contudo, logo percebeu-se a grandiosidade dessa obra, a qual apresenta definições e demonstrações que embasaram a Mecânica Clássica.
Essa grande obra pode ser dividida em três livros. Considerando esses livros e as colocações apresentadas em cada um deles, faça a relação correta:
(1) Livro I.
(2) Livro II.
(3) Livro III.

( ) Aborda fundamentos da mecânica em sistemas teóricos, com base em raciocínios matemáticos.
( ) Abordou a Teoria da Gravitação Universal para os planetas.
( ) Tratou sobre o movimento dos corpos que sofrem resistência proporcional às suas velocidades.
( ) Estabelece a força da gravidade como aquela responsável pela órbita dos planetas.

Assinale a alternativa que apresenta a relação correta, de cima para baixo:

a) 1, 3, 2, 3.
b) 2, 3, 1, 3.
c) 3, 2, 1, 2.
d) 1, 3, 3, 2.
e) 2, 2, 1, 3.

3. Newton foi fortemente influenciado por grandes nomes como Galileu, Descartes, Bacon, entre outros. A respeito das premissas sobre as quais Newton se fundamentou, analise as afirmativas a seguir:
I – Quando uma proposição é obtida por meio de uma dedução correta, ela pode ser considerada válida para sempre, pois não surgirão novos experimentos que apontem falhas ou limites para ela.
II- Para construir uma teoria científica é necessário relacionar um grande número de fenômenos buscando encontrar uma causa comum para eles.
III – Analisar cada fenômeno relacionando com todas as causas existentes e com o número máximo de premissas, mesmo que aparentemente desconexas, para gerar o modelo mais completo possível.
IV. As conclusões obtidas a partir de testes experimentais com determinados corpos poderiam ser estendidas para todos os outros corpos.

Assinale a alternativa que apresenta apenas afirmativas corretas:

a) As afirmativas II, III e IV estão corretas.
b) Somente as afirmativas III e IV estão corretas.
c) Somente as afirmativas I e II estão corretas.
d) Somente as afirmativas II e IV estão corretas.
e) Somente as afirmativas I e III estão corretas.

Seção 2.3

Outras contribuições de Isaac Newton

Diálogo aberto

Você já pensou em como seria o mundo atual sem instrumentos ópticos, tais como, o microscópio e o telescópio? Ou mesmo espelhos para as pessoas se arrumarem todos os dias? Saiba que a criação e evolução desses instrumentos foram muito importantes para, até mesmo, a nossa longevidade. É isso mesmo! Afinal, espelhos, prismas e lentes que são utilizados para compor equipamentos sofisticados, como microscópios e telescópios, que permitem conhecer mundos inacessíveis a olho nu. Sem os microscópios, por exemplo, não seria possível realizar pesquisas médicas e de materiais de engenharia que contribuíram muito para a sociedade atual, assim como sem os telescópios, não seria possível conhecer cada vez mais o cosmos.

São inúmeras as aplicações de conhecimentos ópticos que facilitam nosso dia-a-dia: em espelhos retrovisores de automóveis, em fibras ópticas utilizadas em diversos recursos tecnológicos, em lentes utilizadas para corrigir a visão humana, em filmadoras, entre muitas outras.

Você sabia que Isaac Newton é um dos grandes nomes associados à história do desenvolvimento de teorias da Óptica? Pois é, além de grandes contribuições para a Mecânica, Newton também proporcionou grandes contribuições para essa área de conhecimentos da Física.

Assumindo a posição de um professor de Física do Ensino Médio que está desenvolvendo um projeto de divulgação da História das Ciências por meio de redes sociais, como o *WhatsApp*, o *Instagram*, o *Facebook* e o *YouTube*, você desenvolverá, junto com sua turma que está estudando Óptica, um trabalho voltado a contemplar aspectos históricos das Ciências que evidenciam contribuições de Newton para a área da Física que estão estudando em sala de aula. Nesse projeto, os alunos deverão elaborar uma apresentação

com diagramas e figuras ilustrativas para explicar as principais contribuições de Isaac Newton para a Óptica.

Que conhecimentos históricos serão necessários aos seus alunos para elaborar as explicações para os diagramas e figuras ilustrativas? Como você orientará seus alunos desde a realização de pesquisas até a conclusão dessa atividade? Que discussões reflexões a respeito das abordagens históricas e conceituais envolvidas nessa atividade você poderá promover junto aos seus alunos? De que maneira você pode orientar seus alunos a utilizarem o *WhatsApp*, o *Instagram* e o *YouTube* para contribuir com a aprendizagem em Física? Que tipo de dúvidas os alunos trariam? Quais os possíveis erros que poderiam acontecer? Será que os alunos saberiam diferenciar um experimento de Óptica realizado por Newton ou por outro pesquisador?

Para que você possa orientar seus alunos, é fundamental que você conheça os principais aspectos históricos a respeito da descoberta e evolução de teorias da Óptica. Nesta seção, você conhecerá os principais estudiosos que contribuíram com essa área de conhecimento da Física, em que destacaremos as descobertas de Isaac Newton, como as relacionadas à natureza das cores e à construção de telescópios.

Com certeza esses conhecimentos direcionarão você às respostas necessárias para conduzir, com sucesso, o projeto que você vem desenvolvendo com seus alunos.

Bons estudos!

Não pode faltar

Grandes nomes precederam Newton, os quais fundamentaram seus estudos. Por exemplo, Galileu Galilei (1564-1642) com seus interesses em resolver problemas geométricos, como aqueles envolvendo centros de gravidade e sólidos geométricos, e inventos e aperfeiçoamentos de telescópios, dentre outros estudos. Outro grande nome que precedeu Newton e influenciou seus estudos foi René Descartes (1596-1650), com o seu método dedutivo.

E, certamente, dentre os grandes "gigantes" sobre os ombros dos quais Newton se apoiou, não podemos deixar de recordar Johannes Kepler (1571-1630). Inclusive, fundamentado nos estudos de Kepler, na obra *Principia*, Newton apresenta uma dedução

matemática de que, nas interações gravitacionais, os planetas e cometas deveriam seguir trajetórias em seções cônicas (círculo, elipse, parábola ou hipérbole), concordando com as observações de Kepler. Nos *Principia*, Newton apresenta que todo corpo que se move sobre alguma curva descrita no plano descreve áreas proporcionais aos tempos e é "empurrado" por uma força centrípeta. E, seja qual for a velocidade desse corpo, Newton afirma que sob a ação de uma força centrípeta de quadrado inverso se moverá segundo uma das cônicas.

Muito além de estudar o movimento dos corpos, baseando-se nas leis de Kepler (1571-1630) e nos estudos de Descartes (1596-1650) entre outros, Isaac Newton (1643-1727) elaborou grandes contribuições para o campo da Óptica.

Mas, antes de abordarmos a respeito de suas contribuições, vamos fazer um breve retorno no tempo e compreender os principais marcos históricos sobre as teorias da Óptica que antecederam as descobertas de Newton.

A luz é um fenômeno natural cuja natureza instiga o ser humano desde a Antiguidade, já tendo sido considerada por muitos povos como manifestação de origem sobrenatural ou divina. Afinal, qual seria a origem da luz? As discussões eram se a visão provinha de raios emitidos pelo olho humano, recebidos por ele, ou ambos ao mesmo tempo?

No século XVII, as principais ideias tidas como verdadeiras relacionadas à Óptica eram que as fontes de luz seriam os astros (sobretudo, o Sol) e as chamas; que os objetos, quando são iluminados, "devolvem" uma luz mais ou menos colorida; que a luz se propaga em linha reta; e, que é passível de sofrer refrações e reflexões, conforme o meio (LA COTARDIÈRE, 2010).

A divergência de ideias era muito grande para explicar esse fenômeno e as diferentes explicações fornecidas eram incompletas. Por um lado, haviam aqueles que acreditavam que a luz é constituída por partículas e, por outro, haviam os que defendiam que a luz teria um comportamento ondulatório, análogo ao do som. As explicações fornecidas por ambos os lados eram condizentes para explicar algumas propriedades da luz, mas nenhuma fornecia descrições completas para a mesma.

Quanto aos espelhos e lentes, estes já serviam para diversas finalidades práticas na Antiguidade, inclusive você já conhece a lenda de que Arquimedes (287-212 a.C.) teria utilizado um jogo de espelhos côncavos a fim de convergir raios do Sol para queimar navios inimigos. Entretanto, foi a partir do final do século XVI que a Óptica passou por um de seus maiores períodos de desenvolvimento, inclusive, devido à fabricação de lentes para compor lunetas, as quais permitiram, por exemplo, os grandiosos estudos de Galileu (1564-1642).

Fazendo um breve retorno à antiguidade, encontramos que os espelhos da época eram reflexos em vasilhas com água, polimento de rochas e minerais, vidro natural vulcânico etc. Além disso, existem registros de espelhos de metal coberto com vidro, produzidos há 2000 anos. Também são antigos os registros sobre câmaras escuras, em que imagens invertidas eram projetadas a partir de furos levando a uma sala escura. Há exemplos de câmara escura: na China antiga; numa possível avaliação por Aristóteles e Euclides; na análise de Alhazen ao defender que a luz era emitida por corpos luminosos que, ao "iluminar os objetos, é difundida por estes, que se tornam fontes secundárias. Estas reenviam a luz em todas as direções ("em forma de esfera"), que se propaga em linha reta" (LA COTARDIÈRE, 2010, p. 103). Portanto, tudo isso podemos considerar como importantes evidências para a propagação em linhas retas dos raios de luz. Além disso, desde a antiguidade também encontramos evidências a respeito de uso de lentes, como a Lente de Ninrud (século 7 a.C.), que era usada para acender fogueiras (há referências gregas, mas certamente utilizadas no período Romano), além das lentes de aumento e invenção dos óculos no século 13.

Pierre de Fermat (1607-1665), por volta de 1650, formulou o que chamamos de Princípio de Fermat do Mínimo Tempo, o qual traz a ideia de que, dentre todas as trajetórias possíveis entre um ponto e outro, a luz sempre escolhe o caminho que requer o menor tempo. É esse o princípio que está subjacente a todas as equações que descrevem as trajetórias da luz. Inclusive, é a partir desse teorema que podemos compreender os fenômenos de reflexão e refração da luz.

O conceito de plano de reflexão, de que todos os fenômenos ópticos acontecem em um plano que contém a trajetória de incidência, a de saída, e que possui o eixo perpendicular à superfície

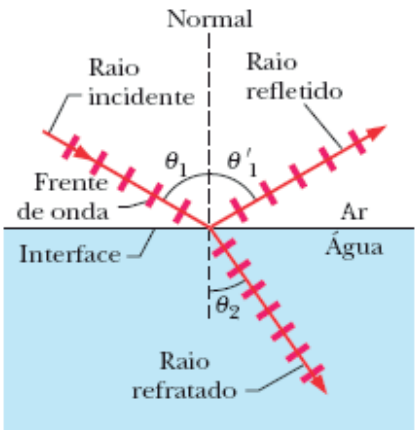
refletora, é descrito pela lei que diz que o raio refletido está no plano de incidência e tem um ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência $\theta_1 = \theta_1^{'}$. Portanto, o fenômeno de reflexão ocorre quando os raios de luz atingem uma superfície, alterando suas direções.

As propriedades de convergência ou divergência das lentes devem-se aos raios luminosos que são desviados ao passarem de um meio transparente para outro e, tais propriedades, pautam-se na lei da refração, que diz que o raio refratado está no plano de incidência e tem um ângulo de refração θ_2 que está relacionado ao ângulo de incidência θ_1 .

Essa relação constante, ou *índices de refração*, depende do meio que está sendo considerado, por exemplo, ar, água ou vidro, e a "lei dos senos" foi publicada pela primeira vez por Christiaan Huygens (1629-1695) e René Descartes (1596-1650), ainda que estes tenham apresentado ideias diferentes entre si para o mesmo fenômeno. Contudo, antes de suas publicações, o holandês Willebrord Snell van Royen (1580-1626) já havia descoberto essa relação constante e, por isso, a lei quantitativa da refração é hoje conhecida por Lei de Snell.

A partir dessa lei, temos que quando um raio luminoso, emitido por uma fonte, atinge um determinado ponto da superfície de um corpo transparente, como vidro ou água, ele é desviado ao mudar de meio, a Figura 2.7 ilustra, ao mesmo tempo, os fenômenos de reflexão e de refração conforme apresentamos:

Figura 2.6 | Fenômeno de refração da luz



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 20).

Retomando o fenômeno de refração, na Figura 2.7, ao atingir um determinado ponto da superfície transparente, o raio forma com essa superfície um ângulo de incidência θ_1. Após atravessar a superfície, evidenciamos a formação de um ângulo de refração θ_2 do raio em relação à superfície.

Segundo a Lei de Snell, a refração pode ser descrita matematicamente pela seguinte relação:

$$n_1 \cdot sen\theta_1 = n_2 \cdot sen\theta_2$$

Em que n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios existentes de cada lado da superfície delimitadora, que dependem de sua densidade, entre outros fatores. O índice de refração do vácuo é 1, que também é uma boa aproximação para o índice de refração do ar, enquanto meios mais densos tem índices maiores.

Exemplificando

Diversas das expressões matemáticas utilizadas para expressar leis físicas levam o nome de quem formulou a teoria, tal como acontece na Lei de Snell. Durante as aulas de Física, uma boa oportunidade para introduzir a abordagens históricas das teorias estudadas é conduzir os estudantes a pesquisarem sobre o porquê do nome de algumas leis.

No caso da Lei de Snell, em alguns materiais os alunos poderão encontrar a mesma denominada como Lei de Snell-Descartes. O professor poderá aproveitar essa denominação para debater sobre a descoberta de Snell, mas cuja publicação não foi feita por ele, mas por Descartes e, por isso, a lei levar também o seu nome.

A respeito da divergência de defesas, Descartes afirmava que a luz seria proveniente da vibração dos corpúsculos presentes em todo o espaço e que a luz seria tão mais rápida quanto mais denso fosse o espaço. Por outro lado, Huygens afirmava que a luz seria constituída por uma série de ondas que se propagam no *éter* à alta velocidade, as quais formariam ondas secundárias cujas modulações constituiriam uma espécie de frente de ondas (LA COTARDIÈRE, 2010). Descartes estava errado em seu raciocínio, pois a velocidade da luz é menor em meios mais densos. Mas ambos concordavam na defesa da teoria ondulatória da luz, contrariando as ideias mais

antigas dos filósofos gregos. Depois, Newton realizou sua defesa fulminante da teoria corpuscular da luz no livro *Óptica*.

Em sua obra *Tratado de Luz*, publicado em 1690, Huygens defendia, portanto, que o espaço está preenchido por uma substância que denominou de *éter*, porém, apesar do mesmo nome, não era a mesma ideia de *éter* que defendia Aristóteles (384-322 a.C.), e seria a oscilação desse éter que visualizaríamos como luz, uma vez que sendo a luz uma onda, ela deviria "ondular" em algum meio (CHERMAN, 2005). Tais defesas de Huygens permitiam explicar a propagação da luz em linha reta, bem como os fenômenos de refração e reflexão da luz, mas não explicava as ideias relacionadas à cor.

Pesquise mais

Por que o céu é azul? Por que as nuvens são brancas? Por que o pôr do Sol é vermelho? Com certeza em algum momento você já deve ter se questionado sobre essas e outras cores que observamos e, claro, essa é uma dúvida de muitos alunos da Educação Básica. E, porque não aproveitar essas dúvidas nas aulas de Física?

Acessando o livro Física Conceitual pelo link: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582603413/cfi/539!/4/4@0.00:0.00> (acesso em: 20 jul. 2018), entre as páginas 511-513, você encontrará respostas para esses questionamentos para que possa bem conduzir suas práticas pedagógicas sobre cores nas aulas de Física, de modo a provocar o interesse e curiosidade dos alunos.

Robert Hooke (1635-1703) é quem faz um estudo exploratório das cores produzidas pela luz branca, utilizando, para isso, lâminas finas, anéis de cor originadas a partir do contato entre uma lente convexa e um plano, e a decomposição de um raio luminoso através de um prisma.

Durante seu forçado exílio em Woolsthorpe, considerado como o período em que viveu seus *anni mirabiles* (anos milagrosos), Newton se interessou tanto pela natureza da luz (que ele acreditava ser que ela era constituída por partículas), quanto pela origem das cores. Então, influenciado por Francis Bacon (1561-1626) em seus

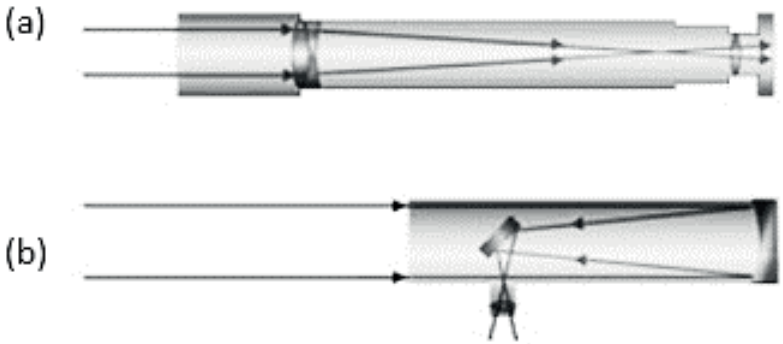
métodos, enfatizando uma abordagem científica embasada no raciocínio indutivo, Newton realizou experimentos com a luz.

Assimile

Em relação à natureza da luz, Newton defendia a teoria corpuscular da luz enquanto que Huygens defendia o modelo ondulatório da luz. Portanto, para Newton, a luz seria composta por partículas, enquanto que, para Huygens, a luz seria uma onda.

Inclusive, foi a partir de seu interesse por estudos da área da Óptica, mais precisamente, a partir de seu interesse em melhor observar cometas e planetas, que Newton montou um novo tipo de telescópio que, ao invés de ser composto por uma lente curva na extremidade anterior e uma ocular nos fundos, era constituído por um espelho curvo para coletar a luz (BRENNAN, 2003). Vamos conhecer as vantagens do telescópio montado por Newton: i) nos telescópios utilizados até então, quando a luz atravessava a lente curva de vidro do telescópio, a refração transformava feixes brancos em feixes coloridos, como um arco-íris, prejudicando o resultado final da observação. Essa foi uma constatação que Newton fez a partir dos experimentos que realizou com os prismas; e ii) era possível encurtar o tamanho do tubo do telescópio e obter um poder maior de aumento daquilo que se deseja observar, uma vez que, ao usar espelhos "os raios convergentes de luz que formam a imagem no foco do aparelho são projetados para frente, utilizando a mesma parte do tubo que os raios incidentes originais, e não a de trás, como acontece num telescópio refrator" (CHERMAN, 2005, p. 48). A Figura 2.8 ilustra a diferença entre o telescópio refrator e o montado por Newton (telescópio refletor):

Figura 2.7 | Telescópio refrator (a) e telescópio refletor (b)



Fonte: Cherman (2005, p. 49).

O telescópio montado por Newton ficou conhecido como "refletor de Newton" e, dos três que ele montou, um foi dado de presente à Royal Society de Londres, que, impressionados com seu telescópio, em 1671, elegeram Newton como um de seus membros. Essa foi uma das motivações para Newton apresentar um breve artigo para divulgar estudos que realizou sobre a luz e as cores. Além disso, essa foi uma época grandiosa para a carreira de Newton, que, cerca de dois anos antes de se tornar membro da Royal Society, havia "herdado" a cadeira de professor de Isaac Barrow (1630-1677), em Cambridge.

Na época, acreditava-se que as cores surgiam de uma modificação da luz, a qual seria originalmente branca. Durante o tempo em que esteve em Woolsthorpe, Newton fez um buraco na parede em um quarto escuro e permitiu que um feixe de luz do sol atingisse seu prisma. Ele verificou que, ao atravessar o prisma, um feixe de luz é refratado, ou seja, é desviado de sua primitiva direção, e que diferentes partes desse feixe sofreram refrações diferentes. Com isso, observou-se uma banda de cores desde o vermelho, até o violeta. A figura a seguir ilustra o experimento realizado por Newton:

Figura 2.8 | Experimento de Newton com a luz

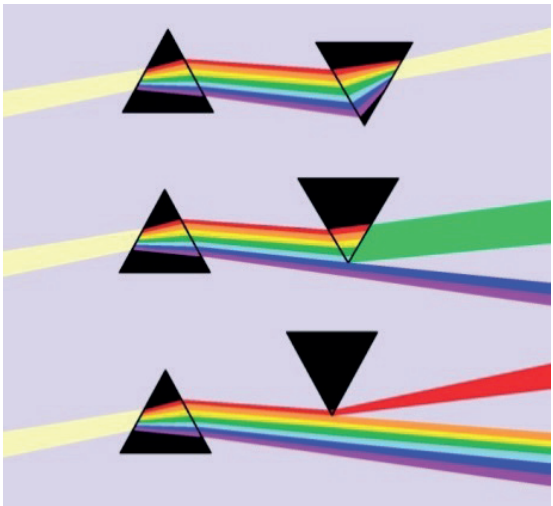
Fonte: <https://library.si.edu/exhibition/color-in-a-new-light/science>. Acesso em: 01 jun. 2018.

Isso não era tão inovador, pois outros já o haviam antecedido nesse experimento, e acreditavam que havia alguma propriedade do vidro do qual era constituído o prisma que seria responsável pela formação das cores. A originalidade de Newton estava na segunda parte de seu experimento: ele acrescentou um segundo prisma, de modo a receber os feixes coloridos de luz provenientes do primeiro (CHERMAN, 2005). Dessa forma, Newton observou que a luz refratada, ao passar por um segundo prisma, formava novamente a luz branca. A partir dessas descobertas, Newton constatou que "a luz não é homogênea e sim complexa e que o fenômeno das cores surge da decomposição de uma mistura heterogênea em seus componentes simples. Concluiu ainda que a luz consiste de partículas minúsculas" (BRENNAN, 2003, p. 42). Vale destacar que, ao passar o segundo prisma a cor já dividida, mantém-se inalterada, e não é "transformada" como acreditavam os antecessores. Então, Newton percebeu que, para isso ser possível, a luz branca deveria ser composta, já que a luz previamente dividida não passava por novas alterações.

A Figura 2.9 ilustra o experimento realizado por Newton, conhecido como *experimentum crucis* (experimento crucial), em que um feixe de luz solar é refratado ao passar por um primeiro

prisma, gerando um espalhamento de feixes multicoloridos. Após, em um segundo prisma, o feixe monocromático é refratado sem alterações:

Figura 2.9 | Experimento crucial de Newton sobre a luz



Fonte: adaptada de <http://www.thestargarden.co.uk/Newtons-theory-of-light.html>. Acesso em: 1 jun. 2018.

A conclusão de Newton era, de certa forma, contraditória à teoria ondulatória da luz, segundo Huygens, a qual prevalecia na época, e suas explicações para justificar suas conclusões produziram reações negativas, sendo frequentemente debatidas por Huygens e Hooke (BRENNAN, 2003). Com isso, Newton afastou-se por um tempo de suas investigações, retomando-as, apenas, em 1675, quando soube que Hooke havia aceitado sua teoria sobre as cores. Contudo, a ausência de afeição entre ambos perdurou por muito tempo, devido às disputas entre eles sobre a autoria de ideias publicadas por Newton em seus artigos sobre as cores e as propriedades da luz.

Somente após a morte de Hooke, Newton publicou a obra *Óptica*, em 1704, a qual reunia suas descobertas realizadas durante cerca de 20 anos a respeito da luz e das cores (BRENNAN, 2003).

Nessa obra, Newton apresenta uma ampla discussão a respeito de tópicos da Óptica, tais como, a teoria das cores, a natureza da luz e explicações para os fenômenos de reflexões, refrações e inflexões. A obra *Óptica* é dividida em três livros, de modo que o

Livro I contempla a teoria de Newton sobre a composição da luz branca, produto de seus experimentos com prismas. No Livro II, Newton apresenta discussões relativas aos fenômenos dos anéis de cores ("Anéis de Newton") e das interações entre luz e matéria. Por fim, no Livro III, Newton trata sobre o fenômeno da inflexão da luz (o que hoje conhecemos por difração) (SILVA; MOURA, 2007).

Saiba mais

Os "anéis de Newton" são anéis coloridos que podemos visualizar em filmes finos de óleo ou de sabão, que foram explicados por Newton no Livro II da obra *Óptica*. No artigo indicado no link a seguir, você conhecerá um pouco mais sobre esse tema. Para melhor compreendê-lo, faça a leitura das páginas 220-226. Assim, você também poderá refletir a respeito da importância das publicações de Newton no Livro II de sua obra. Disponível em: <http://www.lajpe.org/sep08/13_Breno_Arsioli.pdf>. Acesso em: 13 maio 2018.

A respeito dos fenômenos de reflexões, refrações e inflexões tratados por Newton na sua obra *Óptica*, já abordamos sobre a reflexão e a refração no início desta seção. Mas o que seria o fenômeno de inflexão? Talvez você não saiba o que é porque, atualmente, adotamos outra denominação: difração. É um fenômeno menos comum que a reflexão e a refração, a denominação "difração" deve-se ao seu descobridor, Francesco Grimaldi (1618-1663) e refere-se à propagação da luz através de fendas estreitas, em que se observa que a mesma se espalha. A mesma coisa acontece quando uma onda em uma piscina encontra um pequeno orifício. Ondas têm a capacidade de contornar obstáculos. Isso significa que a difração permite que raios de luz se manifestem na região de sombra de um objeto, segundo a óptica geométrica.

Vale destacar que a difração só pode ser adequadamente explicada pela perspectiva ondulatória da luz. Nesse ponto, Newton estava errado em sua argumentação (porém, nada que desmereça o seu trabalho). No fim, a onda se comporta como onda e também como partícula, em seus devidos limites, o que é melhor abordado em estudos de Física Moderna.

No final do Livro III, algo que chama muita atenção na obra *Óptica*, de Newton, são os 31 questionamentos que ele propõe. Todas essas questões são formuladas de maneira negativa e respondidas pelo próprio Newton, que manifesta os fatos mais importantes de suas ideias. Por exemplo, na questão 29, ele apresenta: "os raios de luz não são corpos minúsculos emitidos pelas substâncias que brilham?" E, em resposta a essa pergunta, Newton argumenta afirmativamente sua ideia de natureza corpuscular da luz (CHERMAN, 2005).

A obra *Óptica*, de Newton, provocou um impacto quase tão grande quanto sua obra *Principia*. Contudo, é importante ressaltar que as teorias de óptica estudadas e adotadas na época não foram exatamente as propostas por Newton, mas apenas um sistema simplificado fundamentado na teoria corpuscular da luz (SILVA; MOURA, 2007). Apenas as discussões do Livro I eram abordadas em conferências realizadas por filósofos naturais no século XVIII, porém eram apresentadas experimentalmente de maneira simples e sem adentrar em aspectos mais complexos das teorias newtonianas. Afinal, muitas de suas teorias não poderiam ser facilmente explicadas e mostradas a partir da teoria corpuscular da luz, assim como muitos fenômenos não poderiam ser facilmente explicados a partir da teoria ondulatória de Huygens.

Reflita

Qual foi a importância e o impacto dessas duas teorias, aparentemente divergentes, para a evolução dos conhecimentos relacionados à natureza da luz e suas propriedades? Poderiam ser ambas as teorias de fato consideradas como divergentes?

Sem medo de errar

Para o desenvolvimento de um projeto de divulgação da História das Ciências por meio de redes sociais, como *WhatsApp*, *Instagram*, *Facebook* e *YouTube*, você e um grupo de alunos do Ensino Médio, ao estudar conceitos da Óptica, poderiam elaborar um trabalho voltado a contemplar aspectos históricos das Ciências evidenciando as contribuições de Newton para a área da Física.

Para esse projeto, o grupo de alunos poderia elaborar uma apresentação com diagramas e figuras ilustrativas para explicar as principais contribuições de Isaac Newton para a Óptica. A ideia seria alimentar um diagrama com figuras ilustrativas de modo a evidenciar os principais fatos históricos associados às descobertas principais de Isaac Newton em relação aos estudos de Óptica.

Após algumas pesquisas dos alunos e orientações, a decisão dos alunos poderia ser de que o foco do projeto ficar na grande obra de Newton: *Óptica*. Porém, antecessores à Newton poderiam ser descobertos durante essas pesquisas e os alunos poderiam decidir inserir essas contribuições também dentro do projeto. Assim, um começo poderia ser abordar que, na Antiguidade, surgiram os primeiros questionamentos a respeito da natureza e propriedades da luz e que desde tempos remotos, espelhos e lentes já eram utilizadas para diferentes finalidades, apresentando uma ilustração do lendário jogo de espelhos atribuído à Arquimedes para incendiar navios inimigos. Na sequência, poderia ser apresentada uma ilustração de Galileu observando os céus com uma luneta, fazendo referência à importância de espelhos e lentes para as primeiras descobertas mais avançadas relativas ao Cosmos. Também poderiam ser incluídas referências à Alhazen a respeito de suas defesas de que a luz era emitida e difundida por corpos luminosos, reenviando a luz em todas as direções, com propagação em linha reta.

Como ilustração, apresentar o fenômeno de refração da luz, explicando tal fenômeno, bem como as divergências de ideias entre as publicações de Descartes e Huygens, em que o primeiro afirmava que a luz seria proveniente da vibração dos corpúsculos presentes em todo o espaço e que a luz seria tão mais rápida quanto mais denso fosse o espaço, enquanto que o segundo afirmava que a luz seria constituída por uma série de ondas que se propagam no *éter* à alta velocidade, as quais formariam ondas secundárias cujas modulações constituiriam uma espécie de frente de ondas (LA COTARDIÈRE, 2010).

O próximo ponto de destaque no diagrama poderia ser o *Tratado de Luz*, por Huygens. Trazendo uma ilustração desse grande nome para a Física, os alunos poderiam explicar suas concepções a respeito da natureza ondulatória da luz. Sobre o estudo sobre cores, os alunos poderiam apresentar uma ilustração de Hooke, enfatizando

seus experimentos a respeito de decomposição de raios luminosos a partir de um prisma e a respeito anéis coloridos formados a partir do contato entre uma lente convexa e um plano.

Finalmente, chega a vez de Isaac Newton, trazendo ilustrações de seus principais feitos, como a montagem de um novo modelo de telescópio, seu experimento utilizando dois prismas para realizar a decomposição de raios luminosos, bem como suas concepções a respeito dos fenômenos de reflexão, refração e inflexão (difração) da luz, estudos que o conduziram a concluir que a luz teria uma natureza corpuscular, ou seja, seria composta por partículas deslocando-se me linhas retas. Durante essa abordagem, os alunos poderiam enfatizar o quanto os estudiosos como os anteriormente mencionados fundamentaram as conclusões de Newton, os quais ele respeitava, mas discordou de Huygens e de Hooke no que diz respeito à teoria ondulatória.

A partir das apresentações anteriores, os alunos poderiam fazer uma retomada das principais descobertas de Newton ao apresentar uma ilustração da obra *Óptica*, ao enfatizarem que, nessa obra, Newton forneceu explicações para seu experimento com prismas, anéis de cores, natureza da luz e fenômenos de reflexão, refração e inflexão (difração) da luz. Nesse momento, os alunos também poderiam tecer comentários sobre os instigantes questionamentos e respectivas respostas que Newton apresenta no final de sua obra, de modo a enaltecer suas defesas a respeito de estudos relativos à Óptica.

Uma versão reduzida do diagrama poderia ser elaborada e postada no *Instagram* e no *Facebook* fazendo referência a um *link* do *YouTube* no qual poderia ser encontrada a versão completa do diagrama, apresentado na forma de vídeo com diversas animações e explicações realizadas pelos próprios alunos, sob sua orientação, produzindo, dessa forma, um excelente material didático. Os alunos também utilizariam o *WhatsApp* para enviar, por exemplo, algumas ilustrações utilizadas no diagrama associadas a questionamentos que pudessem atrair a atenção de alunos para tema e, assim, eles acessariam os demais materiais disponibilizados em outras redes sociais.

Avançando na prática

Construção do Disco de Newton

Descrição da situação-problema

Imagine que você é um professor de Física do 2º ano do Ensino Médio e, em uma de suas aulas sobre Óptica, você decidiu apresentar aos seus alunos aspectos históricos sobre o experimento que Newton realizou utilizando prismas, o que o conduziu à conclusão (dentre outras conclusões) de que a luz branca era, na verdade, uma combinação de diferentes cores.

Porém, um aluno lhe questiona: "nesse experimento com prismas, poderia haver alguma influência do vidro na formação das cores e na recomposição da luz branca, não poderia?"

Será que haveria outra maneira de evidenciarmos essa mesma conclusão de Newton sobre a luz branca ser uma combinação de diferentes cores, de modo a tirar qualquer dúvida a respeito da influência do vidro na formação das cores e na recomposição da luz branca? Que proposta didática você poderia adotar para responder a tais questionamentos realizados por esse aluno e permitirem que eles mesmos possam evidenciar a conclusão de Newton de que a luz branca seria uma combinação de diferentes cores?

Resolução da situação-problema

Para responder ao questionamento proposto por seu aluno, bem como permitir aos demais alunos formularem hipóteses e preverem experimentalmente o resultado de Newton sobre as cores, você propôs a construção de um disco colorido que, quando gira muito rapidamente, as cores ficam indistinguíveis, fazendo com que o disco pareça de cor branca. Esse disco é conhecido por Disco de Newton, e é um composto por um círculo dividido em sete partes. Cada uma das partes foi pintada com uma cor do arco-íris, de modo a seguir a ordem: violeta, azul-escuro, azul-claro, verde, amarelo, laranja e vermelho, tal como ilustra a figura 2.10 a seguir:

Figura 2.10 | Disco de Newton

Fonte: iStock.

Você aproveitou que havia um ventilador de mesa antigo na biblioteca da escola e colocou um dos discos produzidos por seus alunos de modo que o centro do disco ficasse localizado no centro das hélices do ventilador, as quais foram retiradas do mesmo para realizar o experimento pretendido.

Antes de dar início ao experimento, você realizou algumas indagações aos seus alunos em relação ao disco, no intuito de que eles pudessem manifestar concepções intuitivas em relação ao experimento que seria realizado. Após o experimento, os alunos foram motivados a manifestar se o que observaram realmente estava de acordo com as suas hipóteses e, sobretudo, foram conduzidos a refletir sobre a relação entre esse experimento e o que foi realizado por Newton com os prismas, evidenciando que, por meio do experimento com o disco colorido, também foi possível perceber que a luz branca é uma combinação de diferentes cores.

A proposta de abordagem adotada pelo professor poderia resultar em uma empolgante demonstração experimental de baixo custo e em uma interessante oportunidade para discutir abordagens conceituais e aspectos históricos da Física.

Faça valer a pena

1. Em uma das mais importantes discussões a respeito da natureza da luz, Isaac Newton defendeu o modelo corpuscular, enquanto que Huygens defendeu seu modelo ondulatório. A respeito desses dois modelos, analise as afirmativas a seguir:
I. No modelo de Huygens, uma onda precisa de um meio para se propagar;
II. Newton deu explicação completa para os fenômenos de reflexão, refração e difração;
III. A teoria da luz como partícula não foi suficiente para explicar os fenômenos de difração da luz;
IV. Para Huygens, a luz se propaga de modo a formar ondas.

Assinale a alternativa que apresenta todas as afirmativas corretas:

a) I, II e III.
b) I, II e IV.
c) I, III e IV.
d) II, III e IV.
e) I e IIII.

2. Considerando os debates entre Newton e Huygens a respeito da natureza da luz, classifique cada uma das afirmativas a seguir como verdadeira (V) ou falsa (F):
( ) Dentre as divergências das concepções de Newton e Huygens estavam as relacionadas à natureza da luz e ao espaço físico de sua propagação.
( ) Newton e Huygens divergiam em suas defesas a respeito do meio de propagação da luz e convergiam em concepções a respeito da natureza ondulatória da luz.
( ) Assumindo métodos e teorias distintas, Newton propôs sua explicação corpuscular para a luz e Huygens defendeu um comportamento ondulatório para a luz.
( ) Para Newton, a luz deveria se propagar em algum meio, de modo que neste a luz pudesse oscilar, Huygens por sua vez, defendia que a propagação da luz não dependeria de um meio material.

Assinale a alternativa que apresenta a resposta correta, respectivamente:

a) V, F, V, F.
b) V, V, F, F.
c) V, F, F, V.
d) F, V, F, V.
e) F, V, F, F.

3. As conclusões de Newton a respeito das cores, bem como das propriedades e da natureza da luz foram fundamentais para o que hoje se sabe sobre essas abordagens. Considerando tais conclusões e aspectos históricos que conduziram a estas, analise as afirmativas a seguir:

I. Um dos experimentos realizados por Newton foi a partir da utilização de prismas. Nesse experimento, ele demonstrou que, ao combinar dois prismas, é possível decompor a luz branca em cores do arco-íris, sendo o procedimento de recomposição impossibilitado pelo fato de cada cor ter um índice de refração diferente entre si.

II. Qualquer uma das cores decompostas por um prisma, a partir de um feixe de luz branca que o atravessa, voltam a ser decompostas em novas cores mediante a passagem por um segundo prisma.

III. O experimento utilizando prismas para decomposição e recomposição de cores foi um dos motivos que levaram Newton a deduzir que que a luz branca era composta por partículas que representavam todas as cores, e que eram separadas pelos prismas, o que caracterizaria cada cor, o que o levou à conclusão da natureza corpuscular da luz.

IV. Ao construir um instrumento óptico, o telescópio refletor, Newton promoveu avanços para os estudos sobre o Cosmos.

Assinale a alternativa que apresenta apenas afirmativas corretas:

a) I e IV.
b) II e III.
c) III e IV.
d) II e IV.
e) I e III.

Referências

ARAGÃO, M. J. **História da física**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

BRAGA, C. **Função:** a alma do ensino da matemática. São Paulo: Annablume-Fapesp, 2006.

BRENNAN, R. P. **Gigantes da Física:** uma história da física moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2000.

_____. **Gigantes da Física:** uma história da física moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2003.

CHERMAN, A. **Sobre os ombros de gigantes:** uma história da física. 2. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2005.

DUGAS, R. **A History of Mechanics.** New York: Dover Books, 2011.

_____. History of Mechanics. **Scientific American**, v. 198, n. 2., 1958. p. 130-132.

FARNDON, J. **A história da ciência por seus grandes nomes.** 6. ed. São Paulo: Duetto Editora, 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física, volume 1:** mecânica. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

_____. **Fundamentos de Física, volume 4:** óptica e física moderna. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

_____. **Fundamentos de Física, volume 2:** gravitação, ondas e termodinâmica. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HEWITT, P. G. **Física conceitual.** 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

_____. Física conceitual. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

LA COTARDIÈRE, P. **História das ciências:** da antiguidade aos nossos dias. v. 1. Lisboa: Edições Texto & Grafia, 2010.

PIRES, A. S. T. **Evolução das ideias da Física.** 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

ROONEY, A. **A história da Física.** São Paulo: M. Books do Brasil Editora Ltda., 2013.

_____. **Surge um novo Universo:** a obra de Kepler e de Galileu. Disponível em: <http://www.cienciamao.usp.br/dados/hpp/_surgeumnovouniversoaobra.arquivopdf.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2018.

SILVA, C. C.; MOURA, B. A. A natureza da ciência por meio do estudo de episódios históricos: o caso da popularização da óptica newtoniana. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, 1602, 2008. p. 01-10.

Desenvolvimento da física clássica e suas aplicações

Convite ao estudo

A maior parte do tempo de aula dos estudantes do Ensino Fundamental e Médio é ocupado com os conhecimentos daquilo que chamamos de Física Clássica, em que incluímos conhecimentos de Mecânica, Eletromagnetismo e Termodinâmica. Assim, tais conteúdos farão parte da rotina do futuro docente. Mas, você já parou para pensar em como todo esse conhecimento foi construído historicamente? Já refletiu sobre como seria o mundo hoje se todas essas teorias não existissem?

Sendo a Física uma das ciências que estuda fenômenos naturais, é evidente que tais fenômenos ocorreriam independentemente de conhecermos os porquês. Contudo, a investigação desses *porquês* tem sido fundamental para que possamos utilizar, sempre que possível, tais fenômenos provocando melhorias em nosso dia a dia. Por exemplo: as descargas elétricas na atmosfera (os raios) são fenômenos naturais estudados na Física, e os conhecimentos sobre descargas elétricas são fundamentais para que hoje possamos ter eletricidade em nossas casas.

Tendo o foco no desenvolvimento histórico da Física Clássica e objetivando que você compreenda e seja capaz de aplicar os conhecimentos da história da Física Clássica para contextualizar e motivar a aprendizagem de seus estudantes em sua futura prática docente, nesta unidade convidamos você a assumir o papel de um professor de Física do Ensino Médio.

Desta vez, você foi convidado pelo Núcleo de Educação Regional, órgão pertencente à Secretaria de Educação do seu Estado, para ministrar um curso de capacitação a professores de Física que lecionam em escolas públicas de Educação Básica.

Você foi escolhido para exercer tal função devido à grande repercussão e destaque de suas aulas de física no Ensino Médio, pois utilizando pressupostos históricos nas aulas de Física Clássica você conseguiu estimular a aprendizagem dos seus alunos, melhorando os índices de aprovação de sua escola em exames como o ENEM (Exame Nacional do Ensino Médio).

Assim, nesse curso, você deverá se dedicar a provocar discussões e reflexões a respeito de como transpor esses conhecimentos históricos para o ensino de conceitos físicos no Ensino Médio. Dessa forma, para que você pudesse explorar a Física de modo amplo e também não exceder o limite de tempo disponível para o curso, você selecionou cuidadosamente três áreas específicas para serem trabalhadas, entre elas, a Mecânica, a Termodinâmica e o Eletromagnetismo, focando especialmente nas abordagens históricas e nos avanços e desenvolvimentos das áreas.

Além da elaboração de materiais didáticos, que ficarão disponíveis para os participantes do curso, você também deverá elaborar estratégias para integrá-los, de modo que eles também tenham a oportunidade de elaborar materiais para suas próximas aulas. Assim, num primeiro momento, visando contemplar abordagens históricas a respeito da Mecânica, você estruturará e sequenciará os pontos mais relevantes a serem discutidos por meio de uma apresentação em Power Point. Em seguida, tendo em vista um trabalho com a Termodinâmica, você elaborará junto com eles, estratégias didáticas que serão organizadas na forma de textos orientadores que, posteriormente, serão divulgados no site do Núcleo de Educação Regional. Por fim, objetivando fomentar discussões históricas a respeito do Eletromagnetismo, você orientará os professores a elaborarem uma proposta experimental.

Que conhecimentos históricos da Física você e os professores envolvidos nesse curso precisarão conhecer para atingir aos objetivos propostos? Como você poderá orientar e conduzir esse curso de modo a despertar a curiosidade e o conhecimento cultural dos professores participantes e, estes, aos de seus alunos?

Para que você possa cumprir todos esses desafios, na primeira seção desta unidade abordaremos os principais aspectos

históricos referentes ao desenvolvimento da Mecânica, em que incluímos a Mecânica dos Fluidos e as Oscilações. Na segunda seção, contemplaremos os desenvolvimentos da Termodinâmica e, por fim, na terceira seção, abordaremos sobre os aspectos históricos da Eletricidade e do Magnetismo.

Bons estudos!

Seção 3.1

Os avanços da mecânica

Diálogo aberto

Astros girando em torno de outros astros, águas descendo rios, ondas sonoras que são geradas por um alto falante, ondas se propagando na superfície da água, enfim, esses são poucos exemplos dentre os inúmeros fenômenos que são estudados pela Mecânica. Mas de que mecânica estamos falando? Afinal, você já sabe que o movimento dos corpos tem sido alvo de grande interesse de estudiosos desde a Antiguidade, como Aristóteles, Arquimedes, Ptolomeu, Copérnico, Galileu, Kepler e Newton e, além disso, você já deve ter lido ou ouvido falar de Einstein, que proporcionou grandes contribuições para o desenvolvimento da Física, sendo um dos grandes nomes que marcou o período da Física Moderna. Mas, você sabia que desde Newton até Einstein também houveram outros grandes nomes na História da Mecânica? Você conhece quem são eles e quais foram as suas principais contribuições? Tenho certeza que de após estudar esta seção você será capaz de responder a esses questionamentos.

Nesta seção, você é convidado a assumir a posição de um professor de Física do Ensino Médio convidado pelo Núcleo de Educação, para ministrar um curso sobre pressupostos históricos a respeito do desenvolvimento da Física Clássica e suas aplicações para professores de Física que lecionam na Educação Básica das escolas da região.

No primeiro momento de curso, visando contemplar abordagens históricas a respeito dos avanços e do desenvolvimento da Mecânica, você optou por estruturar e sequenciar os pontos mais relevantes a serem discutidos, ou seja, os principais marcos históricos a respeito da temática proposta. Você precisará pensar em uma situação didática que pode ser sugerida para os professores, de modo que eles possam colocar em prática, em suas aulas, as discussões promovidas durante o curso. Com esse intuito, você achou conveniente preparar sua apresentação em Power Point.

Que abordagens não podem faltar nessa apresentação, de modo a contemplar fatos históricos e situações didáticas sobre Mecânica, que despertem a curiosidade e o conhecimento cultural dos professores participantes? Como você poderá orientar os professores a realizarem a transposição do que aprenderão no curso para suas práticas em sala de aula na Educação Básica?

Para que você consiga resolver o seu desafio, nesta seção, você conhecerá as principais descobertas relacionadas à Mecânica, após Newton e antes de Einstein, incluindo as principais descobertas e grandes nomes associados ao desenvolvimento de conhecimentos na área de Mecânica dos Fluidos e Oscilações, como Bernoulli e Taylor.

Tais conhecimentos serão fundamentais para fundamentar suas futuras aulas de Física, pois com eles você será capaz de pensar em estratégias de ensino circunstanciadas em contextos históricos, contribuindo para uma aprendizagem mais significativa dos seus futuros alunos.

Não pode faltar

Desenvolvimento da Mecânica pós Newton

Ainda que a Mecânica Clássica tenha origem no século XVII, o desenvolvimento e sistematização de seus princípios gerais só foram realizados um século mais tarde no século XVIII. Isso porque alguns estudiosos da época não estavam convencidos sobre a generalização das três leis de Newton para além de massas pontuais, envolvendo também movimento de fluidos e de corpos rígidos (PIRES, 2011). Dentre os grandes nomes sucessores à Newton, que contribuíram com a sistematização da Mecânica Clássica, destacaremos Euler, D'Alembert, Lagrange, Hamilton, Maupertius e Laplace.

Leonhard Euler (1707-1783) foi um importante matemático e cientista suíço, que estudou profundamente Newton e Huygens e buscou ir além, demonstrando as leis da Mecânica de maneira ainda mais lógica e clara. Em seu tratado *Mechanica, sive motus scientia analytice exposita* (traduzido do latim: *Movimento da ciência mecânica ou analítica exposta*), publicado em 1736, buscava "um princípio geral que incorporasse a segunda lei de Newton. Euler teve de trabalhar um completo aparato de geometria diferencial para curvas reversas" (LA PENHA, 1982, p. 141).

O conceito de força teve um papel de destaque em suas considerações sobre Dinâmica. Para ele, a força aceleradora (*vis accelerativa*) seria responsável por iniciar o movimento de um corpo que se encontra inicialmente em repouso ou por alterar um movimento de um corpo, discutindo incialmente esse efeito em uma única partícula e, depois, generalizou tal efeito para um conjunto de partículas, introduzindo o conceito de massa às suas considerações, formulando pela primeira vez o princípio de momento linear em sua completa generalidade. Em tal princípio, ele estabelece que para um corpo de massa M e posição x, y, z no espaço, sujeito a uma força de componentes P, Q, R, respectivamente atuando nos sentidos $P(x), Q(y), R(z)$, tem-se as notações (LA PENHA, 1982, p. 141):

I. $2M \cdot ddx = P \cdot dt^2$

II. $2M \cdot ddy = Q \cdot dt^2$

III. $2M \cdot ddz = R \cdot dt^2$

As notações apresentadas, ddx, ddy, ddz têm relação com o aumento de velocidade (aceleração) em cada direção no espaço, e dt corresponde a um determinado instante.

Em sua obra, Euler também propõe uma transformação na Mecânica numa forma de ciência racional, contemplando axiomas, definições e deduções lógicas (PIRES, 2011).

Vale destacar também o papel de Euler no estudo da dinâmica de fluidos e também de corpos rígidos, dado que uma dúvida dos cientistas da época de Newton seria se suas leis poderiam ser estendidas além do estudo das partículas. No Tratado *Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum* (traduzido do latim: *A teoria do movimento de um rígido ou sólida*), ele estudou o centro de massa de um corpo rígido, e foi o primeiro a separar o movimento do corpo rígido na soma do movimento do centro de massa com o movimento do corpo rígido com relação a seu centro de massa (rotação), o que facilita muito a análise. Ao estudar rotações de corpos rígidos, até hoje utilizamos os conhecidos "ângulos de Euler". Na dinâmica de fluidos, a partir da conservação de massa, energia e momento linear, Euler obteve as equações que descrevem o movimento de um fluido não-viscoso. Além disso, graças a sua grande habilidade matemática, Euler obteve equações gerais para o movimento de corpos rígidos (DUGAS, 2011).

Jean Lê Rond D'Alembert (1717-1783) publicou em 1743 a obra *Traité de dynamique* (traduzido do francês, *Tratado Dinâmico*), em que apresentou uma interpretação para as leis de Newton, trazendo uma análise crítica da noção de causalidade. Para D'Alembert, "é claro que o movimento, que tem necessidade de uma causa para começar pelo menos a existir, muito menos poderia ser acelerado ou retardado a não ser por uma causa externa" (D'ALEMBERT, 1743, p. viii-x, apud PATY, 2004, p. 24).

Reflita

As considerações de Newton e de D'Alembert sobre as noções de causa e de força eram opostas ou equivalentes no que diz respeito à natureza propriamente física da mudança de movimento?

Para D'Alembert, o maior interesse estava no problema geral da Mecânica que é a mudança de movimento, preocupando-se mais em exprimir matematicamente tal fenômeno do que em recorrer às causas e às forças associadas ao movimento. Assim, definiu força aceleradora (φ), que é equivalente ou ao menos tem relação clara com a aceleração *a,* como uma relação entre variações infinitesimais de tempo (dt) e de velocidade (dv):

$$\varphi \cdot dt = dv$$

$$\varphi = \frac{dv}{dt}$$

Dessa forma, considerando a relação anterior, força motriz (F) era uma noção derivada, de modo que D'Alembert a definia como o produto da massa (m) pela força aceleradora (φ):

$$F = m \cdot \varphi$$

Esse pensamento diferencial das grandezas físicas viria a ser uma transformação decisiva para a sistematização de princípios da Mecânica como ciência, formulando tais princípios racionalmente e, tornando possível o estabelecimento de relações entre grandeza, deduzidas a partir de expressões matemáticas (PATY, 2005). Podemos afirmar que ele contribuiu muito para a dinâmica de fluidos em seus estudos.

É a partir do trabalho de D'Alembert que o matemático italiano Louis de Lagrange (1736-1813) elaborou sua obra *Mecanique analytique*

(traduzido do francês: *Mecânica analítica*), publicada em 1788, adotando a mesma concepção sobre causalidade do movimento. Nessa obra, a primeira parte é dedicada à estática, em que Lagrange fornece leis para explicar fenômenos de equilíbrio a partir da anulação de forças que se opõem. Além disso, é nessa obra que a mecânica de Euler e de D'Alembert são apresentadas de maneira reformulada, num formalismo que hoje denominamos de formalismo lagrangeano. Além desses dois antecessores, Lagrange também faz referência a outros grandes nomes da Física cujos trabalhos fundamentaram, de certa forma, a sua obra, como os de Arquimedes, Galileu e Huygens.

Foi Lagrange o responsável por compilar em um único tratado e em um único corpo teórico todos os esforços e desenvolvimentos da Mecânica no século XVIII. E tudo isso sem geometria ou diagramas, apenas com álgebra e análise (DUGAS, 2011).

Pesquise mais

D'Alembert foi um dos físicos que retomou e criticou as ideias newtonianas, sobretudo, as leis de Newton. Para saber mais sobre suas ideias e concepções que foram tão relevantes para o desenvolvimento da Mecânica Clássica, acesse o artigo intitulado *O elemento diferencial de tempo e a causalidade física na dinâmica de D'Alembert*, disponível em: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00190005/document>. Acesso em: 27 maio 2018. Entre as páginas 01 e 06, você já terá uma ideia geral sobre os tratados de D'Alembert, porém, se possível, leia o material na integra, é um ótimo complemento aos seus estudos.

Além disso, leia a introdução do capítulo 7 do livro disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522126279/cfi/217!/4/4@0.00:0.00>. Acesso em: 26 jun. 2018. A partir dessa leitura, você terá uma visão mais clara sobre as relações entre os trabalhos de Lagrange, Euler e Hamilton.

Atribui-se, ainda, a Lagrange a definição de forças paralelas aos eixos coordenados x, y, z, responsáveis por mover um elemento de massa (m), segundo as relações:

$$m\frac{d^2x}{dt^2}, \quad m\frac{d^2y}{dt^2}, \quad m\frac{d^2z}{dt^2}$$

O formalismo matemático também é uma forte característica presente nos trabalhos de William Rowan Hamilton (1805-1865),

que foi um matemático, físico e astrônomo irlandês. Dentre seus trabalhos, destacam-se contribuições diversas e fundamentais para o desenvolvimento da óptica, da dinâmica e da álgebra, em que, para esta última, foi o responsável pelo desenvolvimento da conhecida álgebra de *quaternions*. Na Física, Hamilton não proporcionou uma nova teoria, mas seus trabalhos foram fundamentais para unificar muitas teorias em um único postulado, capaz de ser aplicado a fenômenos físicos para os quais as equações newtonianas não são aplicavam. Tal postulado é conhecido como o *Princípio de Hamilton*, por vezes também considerado como *Princípio da Mínima Ação*, e por meio dele ficou estabelecido que, em um sistema dinâmico, para todas as possíveis trajetórias em que um corpo possa se mover de um ponto a outro em um determinado intervalo de tempo, a trajetória real, que será seguida, é aquela que minimiza (ou que é extremista ou é ponto de sela) a integral de tempo (t) da diferença entre as energias cinética (K) e potencial (U):

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (K - U) dt = 0$$

Em que δ representa a variação da ação.

Assimile

O Princípio da Mínima Ação é um pressuposto básico da Mecânica Clássica que descreve a evolução tanto do movimento de uma partícula (ou sistema de partículas) quanto de um campo ao longo do tempo, considerando um intervalo extremo para a trajetória que será efetivamente percorrida em um sistema.

Contudo, a primeira das aplicações de um princípio geral da mínima ação na Mecânica não foi realizada por Hamilton, mas por Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759). Foi ele quem primeiro afirmou que a dinâmica do movimento acontece com a mínima ação. Logo em seguida, em 1760, Lagrange atribuiu uma fundamentação matemática para esse princípio. Contudo, todas essas ideias eram menos gerais que o Princípio de Hamilton.

Em um artigo publicado em 1744 à Academia de Ciências de Paris, Maupertius propôs o princípio de ação mínima de maneira aplicada ao fenômeno da refração da luz, que permite provar a

lei de Snell. Em 1746, apresentou outro artigo, neste aplicando o mesmo princípio em situações de colisão entre corpos elásticos, colisão de corpos não elásticos e equilíbrio da alavanca (SILVA; MARTINS, 2007).

Pesquise mais

Saiba mais sobre o princípio mecânico da ação mínima e as contribuições de Maupertius referentes a esse princípio acessando o artigo intitulado **Maupertuis e o princípio mecânico de ação mínima: uma análise crítica**, disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/070701.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2018. Nesse artigo, entre as páginas 626 e 631, você evidenciará aplicações desse princípio.

Outro grande nome para a Mecânica foi Pierre Simon Laplace (1749-1827). Uma de suas principais obras foi *Mécanique Céleste* (traduzido do francês: *Mecânica Celeste*), em que buscou traduzir o estudo geométrico da Mecânica Clássica realizada por Newton para um estudo mais formalizado matematicamente. Além disso, deve-se a ele grandes contribuições para a Matemática que, sem dúvidas, impactaram a Física, como a *transformada de Laplace*, muito utilizada nos estudos referentes à Física-Matemática, cuja expressão matemática é escrita, em notação moderna, como:

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^\infty e^{-st} dt\,[f(t)] = \int_0^\infty f(t) e^{-st} dt$$

Em que $f(t)$ é uma função de tempo, s é uma variável complexa, L é um símbolo operacional que indica que a grandeza que antecede será transformada por meio da integral de Laplace e $F(s)$ é a transformada de Laplace de $f(t)$.

Graças ao desenvolvimento de Euler e de Lagrange foi possível mostrar que as Leis de Newton com a análise de forças e acelerações e a formulação da mecânica em termos de energia potencial e energia cinética são maneira equivalentes de analisar o problema. E, graças ao desenvolvimento de Euler, Lagrange e Hamilton, podemos obter as leis de Newton a partir da formulação da Energia e vice-versa.

Pesquise mais

Em sala de aula, o professor de Física poderá conduzir seus alunos a compreender tais formulações e analogias, mas, para isso, primeiro o professor precisa compreendê-las e, assim, indico que consulte e analise o que expõe o livro *Dinâmica clássica de partículas e sistemas*, nas páginas 224 a 230 (Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522126279/cfi/240!/4/4@0.00:0.00>. Acesso em: 26 jun. 2018).

Você, futuro professor de Física, estará munido para explicar que as duas abordagens são análogas (trabalhar com forças ou com energia), e que o estudante pode escolher o tratamento que facilitar a solução do problema, e a abordagem histórica pode motivar o estudante.

Mecânica dos Fluidos

Leonardo Da Vinci (1452-1519) já descrevia ondas, linhas de correntes, entre outros fenômenos relacionados à hidráulica que observava e experimentava. Mas, foi a partir de Isaac Newton (1642-1727) e seus postulados sobre leis do movimento e leis de viscosidade que problemas relacionados à quantidade de movimento de fluidos puderam ser analisados.

Portanto, foi a partir do século XVIII que se evidenciou as maiores contribuições para a evolução dos conhecimentos em Mecânica dos Fluidos. Dentre os grandes nomes desse período podemos destacar os de Euler, Lagrange, D'Alembert, Laplace e Daniel Bernoulli (1700-1782). Focaremos na descrição das principais contribuições de Bernoulli, uma vez que é possível que você já esteja considerando que uma das principais contribuições dos demais físicos citados para a Mecânica de Fluidos foram relacionadas ao formalismo matemático, elaborando soluções mais formais, sobretudo, para escoamento de fluidos. Vale destacar que a família Bernoulli é composta por 8 eminentes físicos e matemáticos ao longo de dois séculos.

A principal obra de Daniel Bernoulli é a *Hidrodinâmica*, publicada em 1738, na qual é introduzida enfatizando que a teoria sobre a Mecânica dos Fluidos é dividida em duas partes, a Hidrostática e a Hidrodinâmica. A primeira, segundo ele, contempla os estudos relativos à pressão e equilíbrio de líquidos em repouso e, a segunda, envolve teorias a respeito de fluidos em movimento. Apesar de

sua obra ser intitulada como Hidrodinâmica, Bernoulli afirma que não faz sentido estudar essas duas partes da Mecânica dos Fluidos separadamente e, por isso, ambas são evidenciadas em sua obra.

Bernoulli faz referência a outros grandes nomes que o precederam, como Evangelista Torricelli (1608-1647), Blaise Pascal (1623-1662) e Robert Boyle (1627-1691), além de mencionar contribuições de Galileu e Newton.

O francês Pascal, por exemplo, com apenas vinte e três anos de idade reproduziu experiências de Torricelli a respeito de pressão atmosférica, demonstrando que na extremidade mais alta do barômetro existiria algo muito próximo ao vácuo. Contudo, dentre seus trabalhos, enfatizamos o estabelecimento do Princípio de Pascal em 1652, o qual é enunciado como: "A pressão aplicada a um fluido enclausurado é transmitida sem atenuação a cada parte do fluido e para as paredes do reservatório que o contém" (Resnick, Halliday, Krane, 2017, p. 43). A partir desse princípio, temos que, quando a pressão é aplicada em qualquer região de um tubo que contém um fluido, tal pressão será sentida em todos os pontos do interior desse tubo. É esse princípio que explica, por exemplo, o funcionamento de prensas hidráulicas.

Exemplificando

A abordagem sobre o Princípio de Pascal é uma boa oportunidade para propor experimentos em sala de aula circunstanciado por aspectos históricos da Física. Uma sugestão é mencionar os estudos de Pascal sobre o comportamento dos fluidos que o conduziram a enunciar seu princípio. A partir disso, solicitar aos alunos que pensem em alguns exemplos em que esse princípio se aplica e, até mesmo, incentivá-los a realizarem pesquisas sobre como funcionam exatamente tais aplicações.

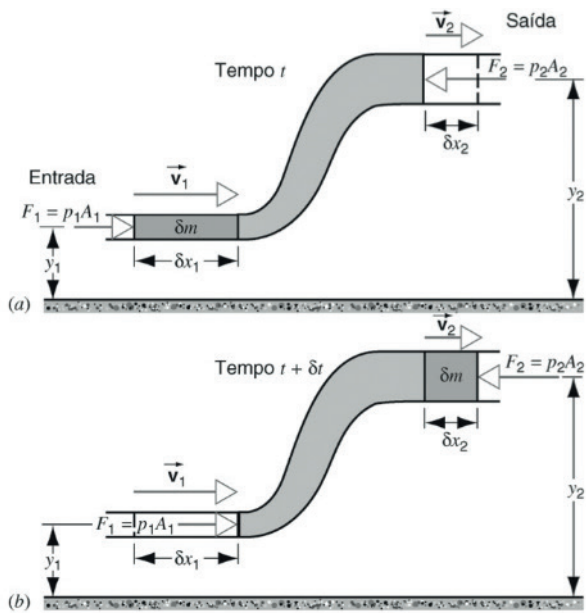
Um aparelho que funciona segundo esse princípio é o elevador hidráulico e para compreender como ele funciona, é possível construir um utilizando seringas, primeiro, com duas seringas iguais e, depois, com seringas de capacidades diferentes.

Para saber exatamente que materiais utilizar e como montar esse experimento, acesse o site disponível em: <http://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/mec34.htm>. Acesso em: 26 jun. 2018.

Voltando a falar sobre Daniel Bernoulli, certamente, dentre os pontos de destaque em sua obra, está o princípio de que a água que flui com maior velocidade exerce pressão menor comparada com aquela que flui mais lentamente, seja esse fluido líquido ou gás. Em outras palavras, "a qualquer ponto em um duto pelo qual o líquido esteja fluindo a soma da energia cinética, energia potencial e energia da pressão de uma dada massa do fluido é constante" (ROONEY, 2013, p. 89). Tais conclusões conduziram à elaboração do Princípio de Bernoulli, que nada mais é que a lei de conservação da energia, ainda que esta tenha sido desenvolvida mais tarde.

O Princípio de Bernoulli refere-se a fluxos suaves e estacionários de fluido com densidade constante e, para exemplificá-lo, considere a água fluindo no interior de um cano, conforme ilustra a Figura 3.1. A água fluirá mais rapidamente ao fluir através de partes mais estreitas do cano, devido à diminuição da pressão interna da água:

Figura 3.1 | Escoamento de um fluido através de um tubo, em um intervalo de (a) até (b)



Fonte: Resnick, Halliday, Krane (2017, p. 64).

Em termos matemáticos, a equação de Bernoulli é representada por:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

ou

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = \text{constante.}$$

Em que p_1 e p_2 são, respectivamente, a pressão de entrada e saída de um tubo, como o ilustrado da Figura 3.1, g é a constante de aceleração gravitacional, v_1 e v_2 são, respectivamente as velocidades de escoamento na entrada e na saída do tubo, y_1 e y_2 correspondem a um deslocamento vertical e ρ é a densidade absoluta da substância.

Outros dois grandes nomes para a Mecânica dos Fluidos são os de Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) e George Gabriel Stokes (1819 – 1903). Eles são responsáveis pela elaboração de um conjunto de equações nomeadas em homenagem a ambos, e que descrevem fluidos em condições muito gerais, incluindo viscosidade, de modo que suas pesquisas foram além da de Euler. Não há solução geral para as equações de Navier-Stokes, de modo que elas podem ser resolvidas analiticamente apenas para casos simples, ou resolvidas numericamente utilizando supercomputadores, porém, essas equações têm muitas aplicações práticas, como o estudo do clima, correntes oceânicas, entre outros.

Oscilações

Ainda no campo dos estudos da Mecânica, não podemos deixar de mencionar pressupostos históricos sobre a Mecânica Oscilatória. Assim como nas demais áreas de estudos da Física, sendo as oscilações um fenômeno natural, não é difícil imaginarmos que desde tempos mais remotos tais fenômenos tenham atraído a atenção de diferentes civilizações. Porém, focaremos nos principais trabalhos desenvolvidos por um grande físico do século XIX: Brook Taylor (1685-1731). Mas vale ressaltar que muitos foram os físicos que o precederam, cujas ideias fundamentaram importantes descobertas realizadas por Taylor, como Isaac Newton (1643-1727) e Edmond Halley (1656-1742).

Taylor escreveu um de seus primeiros artigos antes de se graduar no Saint John's College, em Cambridge, em 1708 (ele se graduou em 1709). Porém, esse artigo só foi publicado na

Philosophical Transactions da *Royal Society* (traduzido do inglês: *Transações Filosóficas da Sociedade Real*) em 1714, e tratava sobre a determinação do centro de oscilações de um corpo.

Contudo, o período mais promissor de Taylor foi entre os anos de 1714 e 1719, em que produziu valiosas contribuições, sobretudo, para a Matemática, mas que, de certa forma, impactaram os estudos na Física. Dentre suas obras nesse período destacam-se dois livros matemáticos publicados em 1715, o *Methodus Incrementorum Directa et Inversa* (Traduzido do latim: *Método incrementar direto e inverso*) e o *Linear Perspective* (Traduzido do inglês: *Perspectiva Linear*). Mais diretamente relacionado à Física, dentre os treze artigos publicados entre os anos de 1712 e 1724, encontram-se aqueles em que Taylor apresenta experimentos com magnetismo e termômetros.

Em seu livro *Methodus Incrementorum Directa et Inversa*, além de Taylor apresentar pontos adicionais à solução de equações diferenciais, ele explicita a determinação de centros de oscilações e percussão, bem como apresenta abordagens sobre curvatura e problemas de vibrações de molas. No caso da determinação de curvaturas, Taylor aplicou seu próprio método e obteve o mesmo resultado obtido por Newton para esse tipo de problema, o qual utilizou procedimentos distintos. Foi essa a obra que levou a qualificar Taylor como um dos fundadores do Cálculo Diferencial Finito, utilizando-o para realizar interpolações e somatório de séries.

Foi a partir dessa obra que Taylor apresentou sua famosa fórmula que leva o seu nome, a Fórmula de Taylor, que consiste em um processo de expansão de funções em séries infinitas, cuja elaboração se fundamentou em pressupostos de Newton sobre utilização de séries para resolver problemas propostos por Kepler e no método adotado por Halley para determinar raízes de equações polinomiais. Portanto, reconhece-se que resoluções de séries infinitas já eram realizadas por alguns de seus antecessores e contemporâneos, porém Taylor foi o primeiro a explicitar uma forma geral para tais resoluções. Porém, a fórmula de Taylor só passou a ser reconhecida a partir dos estudos de Lagrange, em 1772, em que expôs os princípios básicos do Cálculo Diferencial (MARTÍNEZ, 2015).

Newton e outros matemáticos já haviam observado que muitas funções conhecidas, independentemente de serem polinomiais, poderiam ser expressas como "polinômios infinitos"

cujos coeficientes satisfazem determinadas condições (MARTÍNEZ, 2015). Fundamentado em algumas dessas ideias e visando uma generalização das mesmas, Taylor formulou sua famosa fórmula, a qual é válida para determinadas condições sobre a função f:

$$f(x+h)=f(x)+hf'(x)+h^2\frac{f''(x)}{2!}+\ldots$$

A Fórmula de Taylor, portanto, consiste em um processo de expansão de funções em séries infinitas que envolve derivadas, cuja elaboração se fundamentou, sobretudo, em pressupostos de Newton sobre utilização de séries para resolver determinados tipos de problemas.

A Fórmula de Taylor tem grande aplicação na Física-Matemática em métodos numéricos para determinar aproximações e criar gráficos, sobretudo, para estudos relativos à área de Eletromagnetismo. Tal fórmula também tem grande aplicação para descrição e resolução de problemas relacionadas ao pêndulo simples que se comporta como um movimento harmônico simples (MHS) para pequenas amplitudes de oscilações e outros sistemas físicos que se comportam de maneira análoga.

Sem medo de errar

Em seu primeiro momento de curso sobre pressupostos históricos a respeito do desenvolvimento da Física Clássica, com foco no desenvolvimento da Mecânica, você poderia contemplar tópicos específicos sobre Cinemática e Dinâmica. Assim, nesse contexto, você poderia estruturar e sequenciar os pontos mais relevantes a serem discutidos e selecionar algumas situações didáticas para sugerir aos professores, sendo tudo isso elaborado em uma apresentação em Power Point.

Ao organizar sua apresentação, você poderia mencionar os grandes nomes históricos relacionados às descobertas em Mecânica, como Galileu e Newton e, por isso, dar início com abordagens históricas da Física que fazem menção às suas principais descobertas para a Mecânica, dessa forma, já poderia pensar em uma situação didática. No entanto, ponderando que o desenvolvimento da Mecânica não teve fim em Newton,

mas que após ele muitos outros físicos e matemáticos proporcionaram grandes contribuições. Considerando que, em geral, ao falarmos sobre Mecânica na Física muitos alunos logo pensam em Newton e na lendária história da queda da maçã, você poderia imaginar que com os professores talvez a situação poderia não ser tão diferente.

Assim, após abordar alguns aspectos históricos de Newton, você poderia questionar os professores sobre que outros nomes eles conhecem como associados aos estudos da Mecânica.Após, nos slides, você poderia trazer referência aos principais trabalhos de Euler, D'Alembert, Lagrange, Laplace e Maupertius, destacando suas contribuições para a Mecânica, e enfatizando que ainda que suas descobertas tenham se fundamentado em outros físicos antecessores, sobretudo em Newton, eles complementaram teorias anteriores ou elaboraram métodos mais sofisticados para resolver diversos problemas de Mecânica.

Após toda essa apresentação, você poderia mais uma vez indagar os professores e, dessa vez, levá-los a refletir sobre duas situações: a) Para aqueles professores de Física, com formação nessa área de conhecimento, como seria possível transpor ao menos algumas ideias de disciplinas de Físico-Matemática estudadas por eles durante a graduação; e, b) Para aqueles professores de Física graduados em Matemática, Ciências ou outra graduação correlata à Física, como conduzir os estudantes a reconhecerem que os conceitos de Mecânica vão muito além das teorias atribuídas à Newton, como suas três famosas leis?

É a partir dessas reflexões e com base nas apresentações anteriores que você poderia esperar que os professores fossem capazes de reconhecer que uma das possibilidades para responder a ambos os questionamentos propostos é por meio da introdução de aspectos históricos nas aulas de Física.

Nesse direcionamento, a situação didática que você poderia propor aos professores, de modo a mostrar a eles uma possibilidade de inserção das discussões realizadas em suas práticas em sala de aula com alunos de Física do Ensino Médio, corresponderia a provocar nos alunos a curiosidade em descobrir quem são outros grandes nomes da Mecânica, entre Newton e Einstein, que são alguns dos nomes mais conhecidos nessa área de estudos da Física.

A proposta consistiria em identificar aspectos das leis de Newton como, as relacionadas à alteração de movimento, seja teoricamente (aula expositiva, apresentação de vídeos, leitura de um texto, etc.) ou por meio de atividades experimentais, de modo a provocar nos alunos a curiosidade por descobrir outros físicos que ficaram famosos por suas descobertas que vieram a complementar as grandes ideias de Newton.

Sem adentrar muito nas expressões matemáticas que não fazem parte dos estudos de estudantes da Educação Básica, como às pertencentes ao Cálculo Diferencial e Integral, você poderia incluir em suas apresentações trechos de um vídeo, que você poderia apresentar aos poucos, realizando pequenos intervalos para que possa acrescentar suas explicações e colocações. O vídeo escolhido poderia ser o vídeo intitulado *Mecânica - Aula 1 - Curta História da Mecânica*, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=x8vTvRus8Do&t=38s>. Acesso em: 28 maio 2018. Nesse vídeo, a partir dos 20 minutos, são apresentadas algumas das principais contribuições de Euler, o qual estendeu a Mecânica a um ponto para os corpos rígidos (sistema de partículas), de Lagrange, que estabeleceu uma matemática reformulada, Hamilton, que com base em Lagrange e outros, apresenta princípios sobre a mínima ação, entre outros.

Dessa forma, os professores terão a oportunidade de conhecer mais sobre a História da Mecânica e transpor tais conhecimentos aos seus alunos, inserindo aspectos históricos em suas aulas de Física de maneira a aguçar a curiosidade dos estudantes e auxiliá-los na construção de seus aprendizados em Física.

Avançando na prática

Investigação sobre efeitos de Bernoulli

Descrição da situação-problema

Após uma aula sobre Mecânica dos Fluidos, ministrada a uma turma do primeiro ano do Ensino Médio, em que foi apresentado o Teorema de Bernoulli, você, professor de Física dessa turma, decidiu ir além da teoria e inserir seus alunos em atividades investigativas e

historicamente contextualizadas. Por isso, solicitou aos alunos que se dividissem em pequenos grupos e elaborassem uma apresentação para a turma, destacando contextos históricos sobre o Teorema de Bernoulli, e que apresentassem alguma atividade ou experimento que elucide o efeito de sua teoria. Que fatos históricos são mais relevantes para a apresentação de seus alunos? Que exemplo de atividade ou experimento poderá ser proposta por um pequeno grupo de alunos?

Resolução da situação-problema

Considerando o contexto histórico, é importante que, durante a apresentação, cada grupo de estudantes não deixe de mencionar a principal obra de Daniel Bernoulli, *Hidrodinâmica*, publicada em 1738, destacando seus principais tratados a respeito de pressão, equilíbrio de líquidos em repouso e fluidos. Dentre estes, é importante destacar o princípio que leva o seu nome, o qual refere-se ao movimento do fluido que será mais rápido quando contido em uma região mais estreita, devido à diminuição de pressão.

Para elucidar tal efeito, uma atividade experimental simples que os alunos poderão realizar em sala de aula é soprar sobre uma folha de papel cortada em forma de fita larga. Ao soprá-la, a maior intensidade da velocidade de escoamento do ar (que também é um fluido) sobre a folha fará com que a pressão nessa superfície seja menor que a pressão exercida sobre a face de baixo do mesmo papel. Por isso, observa-se que a folha de papel se eleva, admitindo uma posição quase que horizontal (DOCA; BISCUOLA; BÔAS, 2010), conforme ilustra a Figura 3.2:

Figura 3.2 | Efeito Bernoulli

Fonte: <http://fisicaevestibular.com.br/novo/mecanica/hidrodinamica/equacao-da-continuidade-equacao-de-bernoulli/>. Acesso em: 17 jun. 2018.

Faça valer a pena

1. Diversos foram os matemáticos e físicos que contribuíram para a evolução dos conceitos da Mecânica após Newton, buscando complementar suas teorias. A seguir, alguns dos nomes de destaque na Mecânica pós Newton são apresentados. Faça relações corretas entre cada nome e suas principais contribuições.

I. Leonhard Euler.
II. William Rowan Hamilton.
III. Daniel Bernoulli.
IV. Brook Taylor.

( ) Integrou teorias anteriores por meio de um postulado que satisfaz uma gama maior de situações se comparado às formulações de Newton e propôs um formalismo para a Energia.
( ) Compilou leis da Mecânica de Newton e Huygens em um todo coerente.
( ) Estabeleceu o princípio que descreve o comportamento de um fluido em termos de densidade, pressão e velocidade, relacionando com o princípio da conservação da energia.
( ) Estabeleceu uma fórmula capaz de descrever e resolver problemas relacionados a fenômenos que manifestam comportamento oscilatório de pequenas amplitudes.

Assinale a alternativa que apresenta a relação correta, de cima para baixo:
a) II, I, IV, III.
b) II, III, IV, I.
c) II, I, III, IV.
d) III, I, II, IV.
e) IV, II, III, I.

2. Dentre os grandes nomes da Mecânica dos Fluidos podemos destacar Bernoulli. Considerando a história de suas contribuições para a Física, analise as afirmativas a seguir:

I. Dividiu os estudos de Mecânica dos Fluidos em duas partes, uma focada nas situações de equilíbrio de fluidos em repouso, e outra associada aos estudos dinâmicos de fluidos.
II. Estabeleceu que a velocidade de escoamento do fluido é diretamente proporcional à área de secção transversal, em que quanto menor a área, menor será a pressão interna do fluido.

III. Segundo o Princípio de Bernoulli, menor pressão do fluido está associada à maior velocidade e energia cinética, enquanto que pressão maior implica menor rapidez e energia cinética.
IV. O Princípio de Bernoulli é entendido como aquele que descreve o comportamento de um fluido de modo consequente à conservação de energia.

Assinale a alternativa que apresenta apenas afirmativas corretas:
a) I, II e IV.
b) II, III e IV.
c) I, II e III.
d) I, III e IV.
e) I, II, III e IV.

3. Considerando o contexto histórico que culminou nas considerações de Taylor como um dos pais do Cálculo Diferencial Finito e grande nome para a Física, devido às suas contribuições para essa área, sobretudo para a Mecânica Oscilatória, analise as afirmativas a seguir:
I. Dentre seus trabalhos voltados para a Física, encontram-se aqueles que contemplam abordagens sobre oscilações e curvaturas.
II. Para determinar curvas, Taylor aplicou mesmos métodos de Newton, obtendo resultados distintos para mesmas situações problemas envolvendo curvaturas.
III. Taylor foi pioneiro na resolução de séries infinitas e, por isso, é considerado como principal fundador do Cálculo Diferencial Finito.

Assinale a alternativa que apresenta apenas afirmativas corretas:
a) Apenas I.
b) Apenas II.
c) Apenas III.
d) Apenas I e II.
e) Apenas I e III.

Seção 3.2

Termodinâmica

Diálogo aberto

Chegou o momento de você "viajar" na história do desenvolvimento da Termodinâmica, parte da Física que estuda o calor e o trabalho e suas transformações em energia mecânica. Vale lembrar que existem vários tipos de trabalho: expansão e compressão de líquidos e gases, alongamento de uma barra sólida, estiramento de uma película líquida, potência transmitida por um eixo, potência elétrica, trabalho devido à polarização ou magnetização, dentre outros. Para que você visualize um exemplo desses tipos de transformações basta pensar nas velhas locomotivas a vapor, que no Brasil foram apelidadas de Maria-fumaça, que funcionam com base na transformação da energia química, proveniente do carvão, que gera energia na forma de calor (produzindo gás ou vapor) para provocar a realização de um trabalho mecânico.

Você nunca viu uma Maria-fumaça? Tudo bem, temos outro exemplo mais próximo de sua realidade cotidiana. Uma máquina térmica que faz parte do nosso dia-a-dia é o motor do automóvel. Você faz ideia de como esses motores funcionam, seja o veículo movido a gasolina, etanol ou diesel? A explosão desses combustíveis origina gases aquecidos que empurram o pistão do motor, realizando trabalho. Tal movimento é transferido para as rodas, proporcionando o movimento do veículo. Portanto, nesse caso, também há transformação de energia química, proveniente da combustão (reação química de quebra das ligações no interior das moléculas dos reagentes, formando os produtos) gasolina, etanol ou diesel, em trabalho mecânico.

Para saber mais sobre calor e suas transformações e, sobretudo, a respeito de como todo esse conhecimento foi produzido e desenvolvido com o passar do tempo, nessa seção, você assumirá o papel de um professor de Física do Ensino Médio que foi convidado pelo Núcleo de Educação Regional, órgão pertencente à Secretaria de Educação do seu Estado, para ministrar um curso sobre os pressupostos históricos a respeito do desenvolvimento da Física

Clássica para professores de Física que lecionam na Educação Básica das escolas da região.

Nesse momento do curso, tendo em vista abordar o contexto histórico da Termodinâmica e objetivando integrar os professores do curso às abordagens propostas, de modo que futuramente eles possam realizar a transposição dos conhecimentos construídos a partir do curso para suas salas de aula, você pensará e elaborará, junto com eles, estratégias didáticas em que conhecimentos históricos poderão potencializar a aprendizagem de conceitos físicos. As principais estratégias didáticas deverão ser organizadas na forma de textos orientadores de maneira que possam ser divulgadas no site do Núcleo de Educação Regional para que outros professores de Física da Rede consultem e coloquem em prática em suas aulas.

Que propostas de estratégias didáticas poderão ser divulgadas nesses textos de forma a contemplar aspectos históricos da Termodinâmica com o objetivo de despertar a curiosidade e o conhecimento cultural, primeiro, dos professores e, posteriormente, dos alunos da Educação Básica?

Para responder a esse questionamento é fundamental que você conheça os principais aspectos históricos que marcaram o desenvolvimento da Termodinâmica. Por isso, nesta seção, você estudará os principais fatos relacionados aos primórdios da Termodinâmica e do seu desenvolvimento até o século XIX, enfatizando o período de início da Revolução Industrial, em que o interesse em compreender o funcionamento de máquinas à vapor se intensificou, bem como conhecerá os principais nomes que contribuíram com a construção de teorias para essa área de estudos da Física.

Preparado para encarar mais esse desafio? Então, bons estudos!

Não pode faltar

Primórdios da Termodinâmica: calor e temperatura

Na antiguidade, já havia concepções a respeito de calor, em que se considerava que este fluía de objetos quentes para objetos frios. Para Aristóteles (384-322 a.C.), por exemplo, o calor era considerado como um dos quatro componentes básicos da matéria, em que os outros três eram o frio, a umidade e a secura (CHERMAN, 2005).

Contudo, as ideias relativas a calor começaram a ganhar força a partir do século XVII, sobretudo com as ideias de Robert Boyle (1627-1691), sobre o calor ser uma forma de movimento, que já vinha sendo adotada por alguns nomes que o antecederam, como por Francis Bacon (1561-1626). Aliás, vale ressaltar que o termo "termodinâmica", cunhado por Lord Kelvin (1824-1907), é derivado de palavras gregas, que significam "movimento do calor". Também foi Boyle um dos estudiosos que mostrou que o volume de um gás depende não apenas da temperatura, mas também da pressão, de modo que, a uma temperatura constante, o produto do volume de um gás pela sua pressão é constante (LA COTARDIÈRE, 2010), ou seja, que à temperatura constante a pressão de um gás é inversamente proporcional ao volume (PIRES, 2011).

Saiba mais

Por meio de experimentos desenvolvidos em laboratórios com gases reais, descobriu-se que, para esses gases, a pressão (p), o volume (V) e a temperatura (T, em kelvins) estão relacionadas segundo a expressão matemática:

$$pV = NkT$$

Em que N é o número de moléculas contidas no volume (V) e k é a chamada *constante de Boltzmann* ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,J/K$) (RESNICK; HALLIDAY; KRANE, 2017).

Já próximo ao século XVIII, em 1697, o alemão Georg Ernst Stahl (1660-1734) desenvolveu a teoria do *flogístico*, uma substância hipotética que seria liberada por um corpo ou substância durante a sua combustão. Portanto, o flogístico era considerado uma substância inata de corpos e substâncias, ou seja, naturalmente existente neles, e que a queima do objeto provocava a sua liberação, e se algo tivesse flogístico, então queimaria muito bem (por exemplo, o carvão). Após a queima, os corpos ou substâncias deixavam resíduos, considerados por Stahl como cal, de modo que, segundo ele, se fosse aquecer essa cal, acrescentando o flogístico, seria possível recompor o corpo ou substância (CHERMAN, 2005).

A teoria do flogístico, durante algum tempo, serviu como explicação qualitativa para numerosas transformações químicas

e outros fenômenos observados, como a perda de massa de um material em combustão que atribuíam à perda de flogístico. Porém, no final do século XVIII, tal teoria foi invalidada por Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794).

Lavoisier é considerado o pai da química moderna e ficou conhecido pela formulação da lei de conservação da massa em que afirmou que "na natureza nada se cria, nada se perde, mas tudo se transforma". Tal elaboração foi publicada na obra *Traité* élémentaire *de chimie* (traduzido do francês: Tratado elementar de química), em 1789. Além disso, nessa obra, constam resultados de experimentos em que Lavoisier utilizou de maneira sistemática instrumentos e metodologias e, dentre os experimentos, ele realizou a queima de diferentes substâncias, visando testar as afirmações de Stahl a respeito do flogístico. Durante esses experimentos, algumas observações intrigaram Lavoiser: algumas substâncias, após a queima, mesmo "perdendo flogístico" ficavam mais pesadas. Lavoisier havia realizado algumas queimas de maneira controlada, a partir do confinamento num recipiente que permanecia com o peso constante e, dessa forma, esperava-se que o mesmo fosse acrescido do flogístico emanado (HEWITT, 2015). Lavoisier derrubou a teoria do Flogístico, provando que ela não descreve adequadamente os fenômenos e, além disso, ele percebeu que o aquecimento da cal produzia um gás, ao invés de recompor o corpo ou substância queimada. Esse gás já havia sido descrito pelo químico escocês Joseph Black (1728-1799), que o havia batizado de *ar fixo*, e que hoje conhecemos por gás carbônico. Lavoisier também estudou o ganho ou perda de massa de substâncias que sofriam oxidação ou redução, tendo sido o oxigênio descoberto recentemente em sua época, o qual era chamado de ar deflogisticado.

Também Lavoisier foi quem elaborou a Teoria do Calórico, que supunha a existência de um fluído imponderável, invisível e inodoro, denominado de calórico, que estaria contido em todos os corpos em quantidades específicas. De acordo com essa teoria, quanto maior fosse a temperatura de um corpo, maior seria a sua quantidade de calórico e, quando corpos de temperaturas diferentes fossem colocados em contato entre si, o corpo com maior quantidade de calórico cederia uma parte para o corpo de menor quantidade, até que ambos atingissem a mesma quantidade de calórico e, portanto, a mesma temperatura.

Exemplificando

Será que existe alguma relação entre o éter, da época de Aristóteles, com o flogístico e com o calórico? Essas são reflexões que o professor de Física poderá propor em sala de aula para alunos do Ensino Médio, utilizando como estratégia metodológica a História da Física para as aulas sobre Termologia, mais especificamente, sobre Calor.

Para realizar essa atividade, o professor pode realizar a leitura do artigo disponível em: <http://www.scielo.mec.pt/pdf/ctm/v20n3-4/v20n3-4a08.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2018. Após a leitura desse artigo, o professor poderá pensar proposta de como orientar as discussões de maneira a conduzir os estudantes a evidenciarem, por exemplo, que o éter, o flogístico e o calórico são entidades criadas por físicos e químicos para explicar fenômenos que sem essas criações não seria possível, mas que, na verdade, tais entes nunca existiram. O professor pode, ainda, promover debates a respeito da importância dessas invenções para os avanços nas Ciências.

A teoria do calórico foi abandona após estudos realizados e divulgados por Benjamin Thompson (1753-1814), o conde de Rumford, que, ao trabalhar com canhões, observou que havia uma contínua e proporcional liberação de calor durante a perfuração de barras de ferro que compunham o cano do canhão. Apesar disso, a teoria do calórico foi um avanço com relação às outras teorias. O calor como conhecemos hoje não é um fluido, mas é um fluxo de energia entre um corpo quente e um corpo frio. De todo modo, a teoria do calórico foi um avanço com relação à teoria do flogístico.

Com suas observações, Rumford concluiu que o calor era uma forma de movimento, resgatando ideias já defendidas por Boyle, de modo que seria o trabalho o responsável por produzir o calor, fornecendo, assim, as primeiras ideias para o que mais tarde viria a ser estabelecido como relações entre trabalho e calor na Termodinâmica (LA COTARDIÈRE, 2010).

Falando um pouco mais sobre Joseph Black (1728-1799), além da descrição do gás que hoje conhecemos por gás carbônico, em 1760, ele já havia visualizado o calor como um fluído ponderável, indestrutível e constante, evidenciando que sempre se faz necessário uma quantidade de calor para que uma temperatura seja elevada. Assim, ele definiu a unidade de quantidade de calor, que hoje

denominamos de capacidade térmica, como "a quantidade de fluído necessária para elevar a temperatura de um dado corpo em uma unidade de temperatura" (PIRES, 2011, p. 237). Atualmente, segundo Resnick, Halliday e Krane (2017, p. 254), define-se "capacidade térmica *C* de um corpo como a razão entre a quantidade de energia transferida para um corpo na forma de calor *Q* em um processo qualquer e a sua variação de temperatura correspondente ΔT". Em termos matemáticos, temos:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Também, atribui-se a Black a introdução do conceito de calor latente, considerado como a grandeza física relacionada à quantidade de calor necessária para que uma unidade de massa de uma substância possa mudar de fase, por exemplo, para que a água no estado sólido possa se transformar em líquido. Além disso, foi Black um dos primeiros a distinguir com maior precisão calor de temperatura e, devido à todas as suas contribuições ele é considerado o fundador da ciência da Termometria (PIRES, 2011).

Já discutimos o surgimento do conceito de calor, mas o conceito de temperatura também teve um desenvolvimento interessante. Temos um conceito intuitivo de temperatura, dependente do sentido do tato sobre o que são corpos quentes ou frios, mas a investigação científica exige uma instrumentação e medidas precisas. Um dos pioneiros na criação de dispositivos para avaliar a variação de temperatura foi Galileu Galilei (1564-1642). Em 1593, Galileu criou um instrumento que registrava mudanças de temperatura, que consistia de um tubo de vidro semipreenchido de água colorida (WEWITT, 2015). Ainda que o dispositivo de um termoscópio para observar a temperatura, pois, não possuía uma escala de temperatura, o desenvolvimento posterior dessas escalas só foi possível de ser realizado após a invenção dos termoscópios (CHERMAN, 2005). Apenas em 1611, o italiano Santorio Santorio (1561-1636) adaptou o dispositivo de Galileu, demarcando extremos ao mesmo, o considerando em contato com o gelo e com a chama de uma vela e, em seguida, dividindo o intervalo delimitado entre esses extremos em 110 partes iguais.

Contudo, a escala de Santorio ainda não era totalmente confiável, pois a chama de diferentes velas pode arder em diferentes temperaturas, o que dificultou a padronização. Por volta de 1665,

de maneira independente, Robert Boyle (1627-1691), Robert Hooke (1635-1703) e Christiaan Huygens (1629-1695) sugeriram a necessidade de estabelecer um padrão a partir de um ponto fixo na escala termométrica. Não é difícil imaginarmos que cada um sugeriu um ponto fixo diferente e que o mesmo aconteceu com outros que os precederam. Então, vamos direto aos famosos nomes das principais escalas termométricas que conhecemos atualmente: Fahrenheit e Celsius (sobre Kelvin falaremos mais adiante).

Um objeto só pode ser chamado quente se estiver sendo comparado com um objeto mais frio. A escala termométrica é sempre comparativa. Portanto, para que um termoscópio torne-se um termômetro, ele deve ser calibrado com base em uma escala termométrica, para garantir que o valor no mostrador seja compatível com a temperatura real medida.

Reflita

Seria possível construirmos nossa própria escala termométrica? Em caso afirmativo, de que informações precisaríamos para construí-la?

Daniel Fahrenheit (1686-1736) construiu um termômetro de álcool em 1709 e sugeriu uma escala termométrica em 1714, que considerava desde a temperatura zero de congelamento da água do mar, até a temperatura 96, correspondente à do sangue humano. Em 1718, Fahrenheit passou a adotar o mercúrio em seu termômetro e, mais tarde, estabeleceu a escala que é utilizada até os dias atuais, sobretudo nos Estados Unidos, que tem por extremos as temperaturas de 32 e 212 graus, que corresponderiam, respectivamente, à temperatura de congelamento da água e sua ebulição ao nível do mar (CHERMAN, 2005).

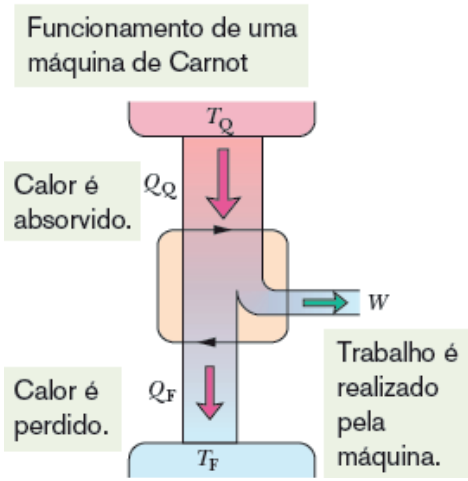
Em 1740, o sueco Carl von Linné (1707-1778) sugeriu a criação de uma escala dividida em 100 graus entre dois pontos fixos, a qual foi criada em 1742 pelo astrônomo Anders Celsius (1701-1744), que considerou como pontos fixos 0 e 100 graus, correspondendo, respectivamente, à fusão e ebulição da água ao nível do mar, conforme proposto por Linné.

Ainda retomaremos os conceitos de calor e temperatura, mas, para que você possa compreender o desenvolvimento da Termodinâmica, ainda precisamos falar sobre a invenção da revolucionária máquina a vapor, a qual ainda está tão presente em nosso cotidiano, como nas usinas termoelétricas e nucleares, na geração de energia elétrica.

As primeiras máquinas a vapor começaram a ser criadas na Inglaterra no século XVII, porém, sua fabricação e evolução se intensificaram durante os séculos XVIII e XIX, marcando um período histórico denominado Revolução Industrial. Dentre essas máquinas, destacaram-se caldeiras e locomotivas alimentadas por carvão. Desse período, destacamos o nome de James Watt (1736-1819), que tornou possível a utilização de máquinas a vapor para uso industrial. Watt percebeu que essas máquinas seriam mais eficientes, com menor gasto de combustível, se fosse acrescida a ela um condensador na parte externa separada do motor. Porém, tudo isso foi realizado ainda sem ter uma ideia clara sobre calor.

O principal responsável por estabelecer uma relação entre calor e trabalho foi Sadi Carnot (1796-1832), que demonstrou que nenhuma máquina térmica é perfeita, pois não existe uma série de processos cujo resultado é a conversão total de energia em trabalho, contida em uma fonte de calor (RESNICK; HALLIDAY; KRANE, 2017). Para ele, as máquinas mais eficientes seriam aquelas capazes de operarem também em seu ciclo inverso, utilizando apenas processo reversíveis. Porém, a máquina de Carnot era uma idealização, na qual não se consideravam perdas por atrito ou turbulência, e em que, ao realizar um ciclo completo, levaria o vapor ou gás de volta ao seu estado inicial, o que é conhecido por Ciclo de Carnot (CHERMAN, 2005). Para Carnot, o trabalho seria produzido pela máquina térmica devido ao trabalho mecânico obtido a partir do calor que flui de uma temperatura alta para uma temperatura mais baixa, em que o funcionamento de uma máquina ideal consistiria em uma sequência de ciclos exercendo esse processo. A Figura 3.3 ilustra o funcionamento de uma máquina térmica.

Figura 3.3 | Máquina térmica



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 264).

Na Figura 3.3, temos o fluxo de energia no interior de uma máquina térmica. Parte do calor retirado da fonte quente T_Q é transformado em trabalho útil pela máquina, o restante é descartado para a fonte fria T_F. O calor $|Q_Q|$ é transferido da fonte de temperatura mais elevada T_Q para a substância de trabalho. O calor $|Q_F|$ é transferido da substância de trabalho para a fonte de baixa temperatura T_F. O trabalho W é realizado pela substância de trabalho sobre algum objeto do ambiente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Vale ressaltar que as ideias associadas ao rendimento da máquina de Carnot serviram como referência para estudos da termodinâmica em relação a determinação de eficiências de máquinas térmicas.

A eficiência de nenhuma máquina térmica real pode igualar ou exceder a eficiência da máquina térmica de Carnot operando entre as mesmas temperaturas T_Q e T_F, cujo rendimento (ε) é determinado por:

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_Q}{T_F}$$

Termodinâmica do século XIX

Em 1804, Rumford realizou algumas experiências sobre a transferência de calor e, de maneira independente, em 1807, Jean-

Baptiste Fourier (1768-1830) encaminhou para a academia francesa um trabalho em que apresentou uma equação de difusão do calor, a qual fazia uso de séries trigonométricas para obter soluções, o que hoje conhecemos por Séries de Fourier. Porém, esse trabalho só foi publicado em 1824, na obra *Mémories de l'Academie des Sciences de l'Institut de France* (traduzindo do francês: Memórias da Academia de Ciências do Instituto da França). Além dessa obra, em 1822, Fourier publicou a *Teoria analítica do calor*, na qual divulgou uma equação diferencial que descrevia a condução do calor (CHERMAN, 2005).

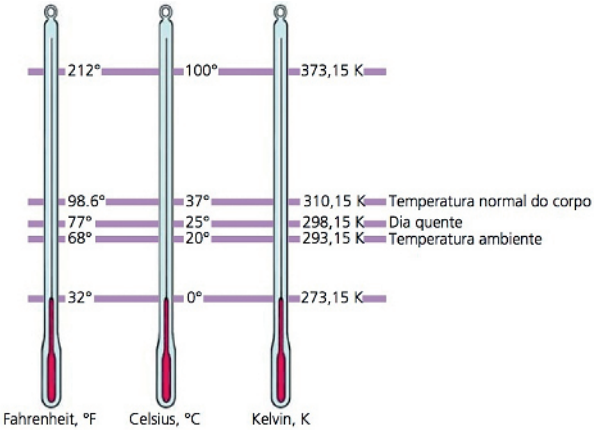
Os trabalhos de Fourier foram os primeiros a influenciar as ideias de William Thomson (1824-1907), o lorde Kelvin. Isso ficou evidente em sua publicação de 1842, *Sobre o movimento uniforme do calor e sua conexão com a teoria matemática da eletricidade*, em que utilizou o método de Fourier em suas demonstrações. Contudo, Kelvin é realmente famoso por seus estudos divulgados em 1848, na obra *Sobre uma escala termométrica absoluta fundada sobre a teoria de Carnot da potência motriz do calor*, em que ele menciona a existência de uma temperatura mínima, absoluta.

Hoje sabemos que a maior temperatura resulta em maior vibração das moléculas no material, de modo que se dois corpos são colocados em contato, a vibração das moléculas do corpo mais quente resulta em um aumento no estado de vibração das moléculas do corpo mais frio. Mas, considerando a vibração das moléculas, foi apenas em 1851 que Lord Kelvin estabeleceu o "zero absoluto" de sua escala termométrica: -273°C, temperatura em que todas as moléculas de um corpo estariam em repouso.

Assimile

As três escalas termométricas mais utilizadas atualmente são: Celsius (que utilizamos no Brasil), Fahrenheit (muito utilizada nos Estados Unidos) e a Kelvin (utilizada pelo Sistema Internacional de Unidades). A relação entre essas escalas é apresentada na Figura 3.4 a seguir:

Figura 3.4 | Escalas termométricas



Fonte: Hewitt (2015, p. 338)

Em 1840, James Prescott Joule (1818-1889) demonstrou que o trabalho de fato poderia gerar calor e determinou o seu equivalente mecânico a partir do experimento com um sistema de palhetas que giravam em um líquido no interior de um calorímetro. Em 1841, ele estabeleceu a lei a respeito da liberação de calor produzida por uma corrente elétrica numa resistência, o que hoje conhecemos por Efeito Joule, sendo esse calor equivalente a um trabalho mecânico, que faz girar o dínamo que produz a corrente elétrica (LA COTARDIÈRE, 2010). Além disso, ele concluiu que o calor era uma forma de energia, e, em 1845, propôs uma teoria de conservação da energia, que só passou a ser aceita a partir dos trabalhos de Lorde Kelvin. Assim, percebeu-se que a variação na energia interna de um sistema é a soma do trabalho realizado sobre ele com o calor transferido para ele.

A conservação da energia associada ao calor passou a ser conhecida como a 1ª Lei da Termodinâmica: "Em qualquer processo termodinâmico entre estados de equilíbrio i e f, a grandeza $Q+W$ possui o mesmo valor para qualquer caminho entre i e f. Esta grandeza é igual à variação no valor da função de estado chamada de energia interna E_{int}" (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 253). Em termos matemáticos, temos:

$$\Delta E_{int} = Q - W$$

Em 1850, o alemão Rudolf Clausius (1822-1888) deu continuidade aos trabalhos de Carnot, lançando as bases matemáticas da Termodinâmica. Clausius se dedicou à equivalência calor-trabalho como compatível com a queda de temperatura descrita por Carnot. Como o princípio de conservação já havia sido estabelecido, foi possível Clausius concluir que "uma máquina a vapor era um mecanismo que absorvia calor de um reservatório quente e convertia parte dele em trabalho, o restante era lançado em um reservatório frio" (PIRES, 2011, p. 245), conforme mostra a Figura 3.3. Ao aceitar a ideia de Carnot sobre toda máquina térmica descartar uma quantidade finita de calor, foi conduzido à formulação da 2ª Lei da Termodinâmica: o calor não flui espontaneamente de um corpo frio para um objeto quente (HEWITT, 2015). Consequentemente, segundo Kelvin, a segunda lei também poderia ser expressa como a impossibilidade de transformar completamente uma certa quantidade de calor em trabalho.

Para a 1ª lei, Clausius deduziu que, em uma máquina térmica, o calor no fluído se divide entre o trabalho realizado e a energia calorífica restituída à fonte fria, caracterizando um processo reversível. Para a 2ª lei, como o calor não pode passar de um corpo para outro mais quente de maneira espontânea, caracterizando um processo irreversível, ocorre a dissipação de energia de modo "desorganizado". Assim, em 1865, Clausius atribuiu à medida do grau de desordem de um sistema o termo *entropia*. Vale ressaltar que Clausius definiu a entropia matematicamente, considerando-a como sendo a "disponibilidade de calor de um sistema". Dessa forma, a 2ª lei pôde ser reescrita como: "[q]uando ocorrem mudanças em um sistema fechado, sua entropia nunca diminui, ela pode crescer (para processos irreversíveis) ou permanecer constante (para processos reversíveis)" (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 286). Assim, em termos matemáticos, temos:

$$\Delta S \geq 0 .$$

Em que ΔS corresponde à variação de entropia de um sistema e o sinal "maior" se aplica aos processos irreversíveis e, o "igual", aos reversíveis. A expressão matemática apresentada é um enunciado da segunda lei da termodinâmica.

Como a 2ª lei da Termodinâmica estabelece que a entropia é máxima no equilíbrio, podemos imaginar que possa existir alguma

relação entre a entropia de um sistema e a probabilidade de ocorrência da distribuição de energia atrelado a essa entropia (PIRES, 2011). Um sistema é composto por diversas moléculas, que por sua vez podem organizar-se de diversas maneiras distintas. A entropia pode ser vista como uma medida do número de maneiras distintas como um sistema pode se organizar. Nessa direção, no final do século XIX, Ludwig Boltzmann (1844-1906) estudou a entropia em nível microscópico, buscando explicar a entropia nesse contexto em termos probabilísticos. Com base em estudos de James Clerk Maxwell (1831-1879) sobre distribuição de velocidades de um gás (que hoje conhecemos por distribuição de Maxwell-Boltzmann), ele estabeleceu as bases da mecânica estatística. Ele provou a relação entre a entropia (S) de um sistema e a probabilidade (W), de maneira a depender do número de modos em que o sistema pode ser constituído. Essa relação é descrita na forma de uma expressão logarítmica:

$$S = k \cdot \log W$$

Além de Boltzmann, existe um outro grande nome associado aos fundamentos da mecânica estatística: Josiah Gibbs (1839-1903). Dentre suas maiores contribuições destacam-se suas abordagens gráficas para solução de problemas estatísticos abrangendo uma grande quantidade de moléculas de um gás (CHERMAN, 2005).

Pesquise mais

Acessando o link indicado a seguir, você encontrará o artigo intitulado *A Obra de Boltzmann em Física*, que traz maiores discussões a respeito da obra de Boltzmann para a Física e, inclusive, apresenta algumas das contribuições de Gibbs de modo a evidenciar a importância de seus trabalhos na fundamentação da mecânica estatística, disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/135312/000564755.pdf?sequence=1>. Acesso em: 3 jun. 2018.

Além disso, o artigo *Acerca da mecânica estatística*, disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v28n3/a02v28n3.pdf> (acesso em: 21 jun. 2018), você saberá mais sobre Boltzmann, sobretudo, a respeito do desenvolvimento histórico da mecânica estatística.

A terceira lei da Termodinâmica foi formulada mais tarde, em 1906, pelo químico alemão Walther Nernst (1864-1914). Ele estudou uma série de reações químicas e formulou a terceira lei da

termodinâmica que, na época, era denominado "teorema do calor", que no enunciado original, era afirmado que, "se uma reação ocorre entre dois cristais puros, com temperatura absoluta zero, a entropia não se altera. Dito de outro modo, o teorema diz que não se pode atingir o zero absoluto por meio de um número finito de passos" (CHERMAN, 2005, p. 104).

Atualmente, tal lei, também conhecida por Postulado de Nernst enuncia que: quando um sistema se aproxima da temperatura (T) do zero absoluto, todos os processos cessam, e a variação da entropia (ΔS) tem um valor mínimo. Em termos matemáticos, temos:

$$\lim_{T \to 0} \Delta S = 0$$

Pesquise mais

Ao estudar o desenvolvimento histórico da termodinâmica, não podemos deixar de abordar sobre o desenvolvimento histórico a teoria cinética dos gases e, por isso, é importante que você aprofunde seus conhecimentos sobre o assunto. Para isso, indico a leitura do artigo *O atomismo grego e a formação do pensamento físico moderno*, da página 08 a 10, disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v35n4/a16v35n4.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2018.

Conheça, também, o desenvolvimento histórico da Lei Zero da Termodinâmica, lendo o artigo *Fahrenheit e Black: o desenvolvimento da Lei Zero da Termodinâmica*, disponível em:

<http://fep.if.usp.br/~profis/experimentando/diurno/downloads/Texto%20Historico%20Fahrenheit%20e%20Black.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2018.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você é um professor de Física que foi convidado a ministrar um curso sobre os pressupostos históricos a respeito do desenvolvimento da Física Clássica para professores de Física da Educação Básica. Nesse momento do curso, você trabalhará o contexto histórico da Termodinâmica, tendo como principal objetivo elaborar estratégias didáticas empregando a história da termodinâmica para potencializar a

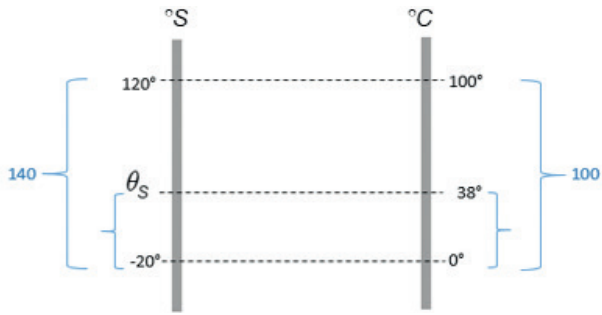
aprendizagem de conceitos físicos, organizando-as na forma de textos que possam ser divulgados, via Internet, para outros professores de Física da Rede.

Uma das estratégias que poderia ser elaborada envolve aspectos históricos a respeito da construção de termômetros com diferentes escalas termométricas. Ao abordar em sala de aula as principais escalas termométricas utilizadas atualmente, ou seja, as escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin, o professor de Física poderá transpor contextos históricos a respeito de como se deram as elaborações de tais escalas, destacando a importância de estabelecer pontos extremos e graduações específicas para cada uma delas. Inclusive, nessa abordagem histórica, é possível orientar os estudantes a pesquisarem outras escalas termométricas que já existiram, como a escala de René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757), entre outras. Leituras de artigos, como o disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v28n1/a13v28n1.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2018. (Páginas 103-106), podem auxiliar na compreensão de outras escalas termométricas que já existiram.

Após as pesquisas, a estratégia didática descrita no texto poderia orientar o professor de Física a incentivar seus alunos a construírem suas próprias escalas termométricas, selecionando dois valores extremos como pontos fixos e adotando seus nomes ou sobrenomes para denominar a escala criada (Por exemplo, a escala *"Silva"*, cujo símbolo para a graduação poderá ser °S). Nesse momento, poderia se discutir a respeito de que valores poderiam ser adotados como pontos fixos e como na História da Física diferentes estudiosos chegaram a valores distintos para tais pontos.

Em seguida, os alunos poderiam estabelecer relações entre a escala produzida por eles com as escalas que mais utilizamos atualmente, de maneia a possibilitar a conversão entre elas. Por exemplo, numa escala de pontos fixos $-20°S$ e $120°S$, quantos graus °S (θ_s) corresponde a $38°C$? Nesse caso, basta considerar que a variação em uma das escalas é proporcional à variação correspondente na outra:

Figura 3.5 | Relações entre escalas termométricas "Silva" ($°S$) e Celsius ($°C$)



Fonte: elaborada pela autora.

Dessa relação, pode-se escrever:

$$\frac{\theta_S - (-20°S)}{120°S - (-20°S)} = \frac{38°C - 0°C}{100°C - 0°C}$$

Vale destacar que também seria possível adotar escalas com base em outras temperaturas do cotidiano, como o ponto de fusão de dois metais, por exemplo.

Preferencialmente, solicitar a cada um dos alunos o procedimento descrito, ou seja, a determinação em suas próprias escalas para um valor específico correspondente em outra escala termométrica, para que assim seja possível promover as discussões a respeito dos resultados obtidos. Como cada aluno criará uma escala diferente dos demais colegas, os resultados serão diferentes e, assim, algumas indagações relacionadas ao contexto histórico da Física poderão ser propostas: qual o motivo das divergências encontradas entre as escalas? Podemos afirmar que uma é mais correta que a outra? Na História da Física, diversas escalas termométricas foram criadas e, nesse contexto, qual foi a importância da descoberta do zero absoluto, considerado na escala Kelvin? E por que essa escala foi escolhida como a considerada como padrão pelo Sistema Internacional de Unidades?

Com questionamentos como esses, é possível conduzir os alunos a refletirem a respeito da importância do estabelecimento de um conceito de temperatura baseada em considerações termodinâmicas, como é o caso da determinação do zero absoluto, e como essa descoberta promoveu avanços frente às escalas termométricas pautadas em pontos selecionados.

Avançando na prática

Uma aula da história da Termodinâmica

Descrição da situação-problema

Suponha que você seja um professor de Física do Ensino Médio que está trabalhando com seus alunos do 2º ano conceitos de Termodinâmica. Em uma de suas aulas, um aluno mostrou a você uma charge que encontrou que ilustra dois pesquisadores em um departamento de inventos. Um dos pesquisadores fala animado para o outro: "Este moto-perpétuo manterá essa roda em movimento por toda a eternidade" e o outro pesquisador descrente pensa: "Eternidade será o tempo para ele provar que isso é um moto-perpétuo".

Ele mencionou que não se lembra de ter estudado moto-perpétuo nas aulas de Termodinâmica, mas que acreditava que era possível dizer que a situação ilustrada na charge seria impossível, segundo conceitos da Termodinâmica. Que explicação, com base em conceitos termodinâmicos, poderia ser dada pelo aluno? Como você poderia aproveitar esse momento para introduzir aspectos históricos da Física para complementar as reflexões e discussões a respeito do assunto?

Resolução da situação-problema

A partir da charge, você poderia conduzir o aluno à compreensão do que seria uma máquina de moto-perpétuo que, no caso, com o seu auxílio, o aluno poderia entender como uma máquina gera sua própria energia, utilizando a energia criada pelo seu movimento para realimentar o seu próprio movimento, num processo cíclico, sendo, portanto, uma máquina que pode realizar trabalho sem a necessidade de uma fonte externa, além de compensar as perdas internas por atrito.

Antes de tudo, o professor poderia indicar que na natureza nenhum processo é perfeito e sempre há interações com o meio e, portanto, há perda de energia por processos dissipativos. Um movimento pode durar por muito tempo, com um grande esforço para a redução de atrito e de outras perdas, mas não será perpétuo. A máquina de moto perpétuo vai além, pois afirma que a energia pode ser fornecida na forma de trabalho para o exterior, ou seja, a máquina

geraria energia sem uma fonte externa. Em termos de termodinâmica, caso se tratasse de uma máquina térmica, a máquina da charge deveria funcionar entre duas temperaturas iguais e, portanto, teria eficiência de Carnot zero, deveria fornecer zero trabalho, pois não há fonte quente da qual ela pudesse extrair energia (calor). Aqui também entraria uma discussão sobre conservação de energia, porque a máquina não pode gerar energia do nada.

A segunda lei da termodinâmica dá o *golpe final*, pois ela prova que nem mesmo o empate é possível, ou seja, fornecer como trabalho toda a energia recebida de uma fonte externa.

A partir da sua explicação, o aluno poderia afirmar com maior certeza que, de fato, a máquina da charge não poderia ser explicada de acordo com conceitos da termodinâmica: uma máquina como um moto-perpétuo nem sequer chega a ser hipotética, pois contraria leis Físicas, sendo sua realização impossível na prática. Isso porque a ilustração caracteriza uma situação em que, em todas as etapas cíclicas, todas as transformações de energia têm um rendimento de 100%, o que viola a 2ª Lei da Termodinâmica, que postula que não é possível a transformação completa do calor fornecido por uma fonte em trabalho.

Para auxiliar nessa explicação, você poderia utilizar aspectos da História da Física a respeito do Ciclo de Carnot e das máquinas térmicas ideais que, de certa forma, consistiam em moto-perpétuo, e que nunca funcionaram porque contrariavam a 2ª Lei da Termodinâmica.

Faça valer a pena

1. O século XIX foi um período de intensos debates e descobertas relacionadas aos conceitos de calor e temperatura. Dentre as contribuições advindas dessa época encontramos as de Rumford (1753-1814) que, durante seu trabalho com perfuração de barras de ferro de canhões, realizou algumas observações que o conduziram a algumas importantes conclusões. A esse respeito, analise as afirmativas a seguir:

I. Rumford percebeu que o aquecimento era proporcional ao trabalho realizado na tarefa de perfuração.

II. A partir de suas observações, foi possível introduzir um modelo cinético de calor, compreendendo-o como energia, opondo-se à concepção de calor como uma substância.

III. As observações realizadas conduziram Rumford a introduzir o modelo de calor como energia, concordando com a concepção sobre o calórico, proposto por Lavoisier.
IV. Em oposição à ideia que predominava na época, Rumford concluiu a relação de conservação entre o calórico e o trabalho, em que um poderia ser convertido no outro, comprovando a conservação de energia.

Assinale a alternativa que apresenta todas as afirmativas corretas:

a) I e II.
b) III e IV.
c) I, II e III.
d) II e IV.
e) I, III e IV.

2. O período da Revolução Industrial foi, certamente, um período que impulsionou as descobertas relacionadas à Termodinâmica, sobretudo no que diz respeito às máquinas térmicas. Nesse período, destacam-se os trabalhos desenvolvidos pelo jovem Carnot (1796-1832).

Sobre seus trabalhos, julgue cada uma das alternativas a seguir como verdadeira (V) ou falsa (F):
( ) Carnot demonstrou, teoricamente, o funcionamento de uma máquina térmica ideal, que consistia em uma operacionalização em ciclo especial, o Ciclo de Carnot.
( ) Segundo Carnot, as máquinas térmicas operando em ciclos de Carnot seriam incapazes de retirar o calor de uma fonte e transformá-la totalmente em trabalho.
( ) Para Carnot, uma máquina térmica seria capaz de transferir calor de ambientes de temperaturas mais baixas para ambientes de temperaturas mais elevadas, sem haver a necessidade de energia extra para esse processo.
( ) Pode-se afirmar que o rendimento da máquina de Carnot serviu como referência para estudos da termodinâmica em relação a determinação de eficiências de máquinas térmicas, ainda que sua máquina térmica de rendimento total fosse impossível na prática.

Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, as valorações corretas para cada afirmativa:

a) V, V, F, F.

b) V, F, F, V.
c) F, F, V, V.
d) V, F, V, F.
e) V, V, F, V.

3. Sobretudo antes do século XIX, haviam dois pontos de vista distintos a respeito da natureza do calor. Sobre esses diferentes pontos de vista, faça a relação correta entre cada nome da História da Física com sua respectiva concepção a respeito da natureza do calor:
1 – Lavoisier.
2 – Boyle.
3 – Rumford.
4 – Stahl.

( ) Associou o calor a uma substância hipotética que seria liberada por um corpo ou substância em combustão.
( ) Foi um dos primeiros a defender a ideia de calor como uma forma de movimento.
( ) O calor estava associado à ideia de calórico de um corpo, o qual seria maior em corpos de temperaturas mais elevadas.
( ) Concordou com ideias anteriores de que o calor seria uma forma de movimento, e estabeleceu uma relação entre o calor e o trabalho.

Assinale a alternativa que apresenta a relação correta:

a) 1, 2, 3, 4.
b) 2, 3, 4, 1.
c) 2, 4, 1, 3.
d) 4, 2, 1, 3.
e) 3, 4, 1, 2.

Seção 3.3

Eletromagnetismo

Diálogo aberto

Considerando o seu cotidiano, pense nos inúmeros equipamentos elétricos e eletrônicos que você utiliza. Tenho certeza de que são muitos. Afinal, o simples ato de ligarmos um interruptor para acendermos a uma luz já traz em si uma série de eventos guiados por leis físicas que permitiram a geração e a transmissão de energia. Aliás, o funcionamento de diversos equipamentos que utilizamos em nosso dia-a-dia pode ser explicado segundo leis físicas relacionadas à eletricidade e ao magnetismo.

Hoje sabemos que efeitos elétricos e magnéticos apresentam relações entre si, mas nem sempre foi dessa forma. Será que os estudantes de Física da Educação Básica sabem disso? E você sabe como surgiram as primeiras evidências da relação entre eletricidade e magnetismo e conhece como se deu a fusão de ambas no que hoje chamamos de Eletromagnetismo?

Defendendo o uso da História da Física como uma ferramenta didática e metodológica de grande potencial para a compreensão significativa de conceitos físicos por meio do despertar do interesse e da curiosidade de estudantes a respeito do desenvolvimento de tais conceitos, convido você a encarar mais um desafio, adentrando, dessa vez, no contexto histórico do Eletromagnetismo. Para isso, você continuará atuando como um professor de Física do Ensino Médio que foi convidado pelo Núcleo de Educação Regional para ministrar um curso sobre o desenvolvimento da Física Clássica a professores de Física a Educação Básica de sua região.

Objetivando fomentar discussões históricas a respeito do Eletromagnetismo e tornar os professores mais independentes em relação à pesquisa de fatos históricos da Física e capazes de elaborar propostas nessa perspectiva para suas salas de aula, você deverá propor a eles que se organizem para elaborarem uma estratégia de ensino circunstanciada por aspectos históricos do Eletromagnetismo. Considere que, após se organizarem,

pesquisarem e discutirem, os professores optaram por elaborar uma proposta experimental.

Quais os aspectos históricos que não podem ser negligenciados em sua proposta? Que experimento poderá ser proposto de modo a contemplar aspectos históricos do Eletromagnetismo? Como você poderá conduzir as pesquisas, discussões e elaboração da proposta experimental de modo fundamentado na História do Eletromagnetismo?

Para que esse desafio possa ser realizado com êxito, muitos conhecimentos deverão ser mobilizados. Tais conhecimentos serão construídos por você durante os estudos dessa seção, a qual contempla os principais aspectos históricos relacionados ao desenvolvimento da Eletricidade e do Magnetismo, bem como às evidências da relação entre ambos que conduziram à fusão no Eletromagnetismo. Além disso, nesse estudo, serão destacados os principais nomes associados à História do Eletromagnetismo.

Preparado para encarar esse desafio? Então, bons estudos!

Não pode faltar

O desenvolvimento da Eletricidade e do Magnetismo

Desde as civilizações mais antigas já haviam alguns conhecimentos empíricos a respeito de efeitos elétricos e magnéticos. No século VI a.C., Tales de Mileto (640-546 a.C.) observou que o âmbar (um tipo de resina fóssil de cor amarelada) quando atritado a uma pele de animal atraia pequenas penas ou palha (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2010).

Há registros de que as civilizações chinesas já utilizavam a bússola desde o século III a.C. Para isso, utilizavam a magnetita, uma pedra de um tipo de óxido de ferro, que, quando livre para girar, alinhava-se sempre na mesma direção e por isso tinha grande utilidade na orientação dos viajantes nas navegações e nas caravanas terrestres.

No entanto, apenas no final do século XVI, maiores contribuições surgiram para as áreas de estudo da eletricidade e do magnetismo. Desse período, um dos nomes de destaque é o de William Gilbert (1540-1603), que foi um físico e médico inglês, além de pesquisador nos campos do magnetismo e eletricidade, repetiu experiências com o âmbar e realizou estudos sobre o imã, cujos resultados foram divulgados na obra *Sobre o imã, corpos magnéticos e o grande imã*

da Terra, publicado em 1600. Apesar de não haver um consenso sobre quem cunhou a palavra eletricidade, alguns historiadores mencionam que foi Gilbert quem utilizou pela primeira vez esse termo, o qual tem origem do grego *élektron*, que significa âmbar. Na obra de 1600, Gilbert também descreve um modelo no qual a Terra se comportaria como um grande imã, estabelecendo, assim, a relação entre o campo magnético terrestre e as agulhas magnéticas das bússolas.

Para explicar o fenômeno de eletrização por atrito, Gilbert apresentou, em sua obra, a existência de um fluído nos materiais. Quando materiais eram atritados, esse fluído era removido, restando uma emanação ao seu redor que seria capaz de atrair outros materiais específicos.

Reflita

Comparando os pressupostos de Gilbert sobre o fenômeno de eletrização por atrito e considerando o que sabemos hoje sobre cargas elétricas e campo elétrico, é possível estabelecer alguma relação? Em que sentido a explicação de Gilbert pode ser considerada como próxima das teorias atuais?

A obra de Gilbert foi importante para impulsionar outras descobertas e algumas construções importantes para os estudos da eletricidade e do magnetismo. Otto Von Guericke (1602-1686), por exemplo, mesmo sem compreender claramente o fenômeno de eletricidade, foi um dos primeiros a construir um aparelho eletrostático utilizando uma bola de enxofre montada sobre um eixo de ferro, encaixado em um suporte de uma caixa de madeira. A bola girava pelo eixo com uma mão enquanto atritada com a outra mão e, após eletrizada, era utilizada para experimentos diversos, dando início à passagem da simples observação para a experimentação, o que foi fundamental para que descobertas fossem realizadas.

Stephen Gray (1666-1736), por volta de 1729, realizou descobertas sobre a eletrização por contato, verificando a possibilidade de transferir a propriedade de atrair ou repelir de um corpo para outro a partir do contato, utilizando fios de diferentes materiais. Dessa forma, além da transferência de propriedades elétricas entre corpos, Gray descobriu e distinguiu diferentes corpos condutores e isolantes (LA

COTARDIÈRE, 2010), formulando o conceito de capacidade específica que cada material tem de transportar eletricidade (CHERMAN, 2005).

Na mesma época, Charles François Du Fay (1698-1739) realizou experimentos de fricção de diferentes materiais e, a partir de suas observações, concluiu existir dois "tipos diferentes de eletricidade", a produzida por materiais transparentes, como cristais e vidros, que denominou de *eletricidade vítria*, e a produzida por corpos resinosos, denominada de *eletricidade resinosa*. Em cada um desses "diferentes tipos de eletricidade", ele observou que corpos que têm carga de um mesmo tipo são repelidos, enquanto que os de cargas opostas são atraídos (LA COTERDIÈRE, 2010).

Em 1745, Pieter Von Musschenbrook (1692-1761), inventou um dispositivo capaz de armazenar "o fluído elétrico", tal como era considerado na época. Esse dispositivo era uma espécie primitiva de capacitor e consistia em uma garrafa recoberta por uma película de prata, denominada de *garrafa de Leyden*, fazendo referência à cidade, nos Países Baixos, em que Musschenbrook trabalhava como professor (CHERMAN, 2005). Com base nesse dispositivo, um de seus alunos, Jean-Antoine Nollet (1700-1770), "atribuiu o fenômeno elétrico ao movimento em direções opostas de dois tipos de fluidos" (PIRES, 2011, p. 266).

Em 1747, o norte-americano Benjamin Franklin (1706-1790) propôs que a carga elétrica seria um fluído elétrico único e que poderia ser transferido de um corpo para outro, de modo que o corpo que perdia esse fluído (que hoje denominamos por carga elétrica) ficava com falta e, por isso, tornava-se negativo. Por outro lado, o corpo que recebia fluido elétrico ficava em excesso e, assim, tornava-se positivo. Atualmente sabemos que o que é transferido entre corpos são os elétrons.

Reflita

Atualmente, nas aulas sobre Eletricidade, os professores de Física têm o desafio de explicar a diferença entre corrente convencional e corrente real nos dispositivos elétricos, pois a velha definição de que a corrente elétrica era transportada por cargas positivas sobreviveu até os dias atuais.

O professor de Física poderia aproveitar aspectos da história da Física para esclarecer essa abordagem, visando diferenciar a corrente real

(elétrons negativos se movendo no condutor, do polo negativo para o positivo) da corrente convencional (corrente elétrica que se move do polo positivo para o polo negativo, usualmente representada nos equipamentos elétricos, mas que não ocorre na realidade).

Foi Franklin quem realizou o famoso experimento com uma chave amarrada ao fio de uma pipa em meio a uma tempestade elétrica, provando que o relâmpago é uma manifestação de cargas elétricas na natureza. Com isso, ainda que involuntariamente, inventou o primeiro para-raios.

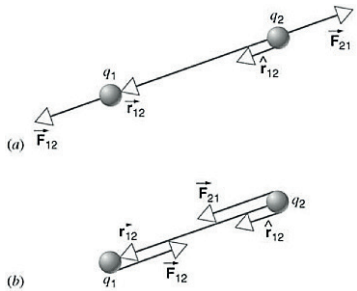
O francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806), formou-se em Engenharia, mas atuou principalmente como um físico, tendo sido responsável pela publicação de diversos tratados sobre eletricidade e magnetismo, entre outras abordagens da Física. Dentre seus experimentos mais famosos, destacamos a experiência histórica com uma balança de torção para quantificar a força exercida entre duas cargas elétricas. Foi a partir desse experimento que ele estabeleceu a chamada lei de Coulomb. Considerando a lei do inverso dos quadrados para a eletricidade e utilizando uma balança de torção, Coulomb realizou experimentações para mensurar atrações e repulsões elétricas que foram fundamentais para formalizar, em 1785, a lei que passou a ter o seu nome e que diz que: "para dois objetos eletricamente carregados e que são muito menores do que a distância existente entre eles, a força os dois varia diretamente com o produto de suas cargas, e inversamente com o quadrado da separação mútua" (HEWITT, 2008, p. 411). E, assim, de maneira similar à lei da atração gravitacional, matematicamente a lei de Coulomb é representada por:

$$\vec{F} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

Em que $k \approx 9 \cdot 10^9 N \cdot m^2 / C^2$ é a constante de proporcionalidade elétrica, o $|\vec{F}|$ é a intensidade da força mútua que age em cada uma das duas cargas, q_1 e q_2, e r é a distância entre seus centros. Vale destacar que a força é uma grandeza vetorial e que, no caso da lei de Coulomb, o sentido da força é determinado pelo sinal relativo das duas cargas elétricas. Conforme ilustra a Figura 3.6, considerando duas cargas pontuais, q_1 e q_2, a uma distância r_{12}, podemos supor as

cargas com mesmo sinal e, assim, a força será repulsiva entre elas (a) ou elas poderão ter cargas opostas entre si em desse modo, a força entre elas será de atração (b):

Figura 3.6 | Duas cargas pontuais à distância r_{12}, com cargas de mesmo sinal (a) e com cargas de sinais opostos (b)



Fonte: Halliday, Resnick e Krane (2017, p. 9).

Em 1800, o físico italiano, Alessandro Volta (1745-1827) construiu a primeira *pilha voltaica*, o primeiro dispositivo capaz de gerar eletricidade a partir de reações químicas, composta por um conjunto de discos alternados de zinco e cobre, separados por eletrólito (substância que, dissociada ou ionizada, origina íons positivos e negativos tornando-se condutor elétrico), e ligados entre si por um fio (PIRES, 2011). A invenção da pilha voltaica foi um marco para os estudos da eletricidade e possibilitou diversos avanços nos estudos dessa área. A respeito do magnetismo, ainda continuaram diversos estudos sobre materiais magnéticos e o campo magnético terrestre (CHERMAN, 2005), mas ainda nenhuma relação havia sido evidenciada entre eletricidade e magnetismo ou, pelo menos, nenhuma evidência sobre ambos havia sido divulgada.

Assimile

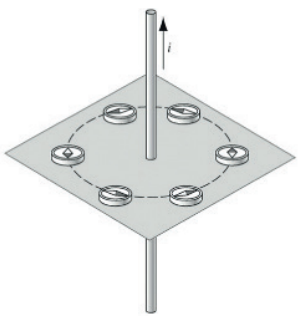
Tales de Mileto (640-546 a.C.) e William Gilbert (1540-1603) são nomes que se destacam dentre as primeiras descobertas sobre o **magnetismo**, o primeiro por realizar as primeiras observações sobre as propriedades do âmbar e, o segundo, por evidenciar que outros materiais manifestavam o mesmo fenômeno que o âmbar quando atritados. Gilbert também realizou importantes descobertas sobre a bússola.

Nos estudos relativos à **eletricidade**, destacam-se Otto Von Guericke (1602-1686), por possibilitar as primeiras experimentações nessa área, Benjamin Franklin (1706-1790), por evidenciar os diferentes tipos de eletricidade como sendo um único tipo e por atribuir as terminologias "positivo" e "negativo" para cargas elétricas, Charles Augustin Coulomb (1736-1806), pela formulação da lei que leva seu nome, e Alessandro Volta (1745-1827), pela invenção da pilha voltaica.

O Eletromagnetismo

Apenas em 1820, o físico e químico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) divulgou na Academia Francesa de Ciências a existência de relação entre fenômenos elétricos e magnéticos, que até as suas pesquisas, não se imaginava a existência de uma relação entre eletricidade e magnetismo, sendo os mesmos vistos como fenômenos completamente distintos. Tal relação foi produto de intensos estudos realizados por ele desde 1807, a partir de experimentações envolvendo, ao mesmo tempo, eletricidade e magnetismo, buscando evidenciar o modo como um fenômeno afetaria o outro. Dentre suas investigações, Oersted demonstrou que ao aproximar uma bússola, com agulha magnética livre de atrito ao girar, de um fio sobre o qual passava uma corrente elétrica, a agulha sofreria uma deflexão na direção em que a agulha apontava, o que indicava que correntes elétricas gerariam campos magnéticos. Vale ressaltar que a agulha pode não defletir, depende do ângulo entre a agulha e o campo elétrico, e que a direção da agulha da bússola está sempre perpendicular à direção da corrente no fio, conforme ilustra a Figura 3.7:

Figura 3.7 | Experimento de Oersted



Fonte: Halliday, Resnick e Krane (2017, p. 202).

Oersted não elaborou as leis quantitativas para o fenômeno que observou, mas sua descoberta marcou o início da relação entre eletricidade e magnetismo e, fundamentadas em suas observações, múltiplas pesquisas começaram a ser desenvolvidas buscando aprofundar os conhecimentos sobre essa relação.

Primeiras teorias referentes a efeitos magnéticos da corrente elétrica são atribuídas ao físico, filósofo, cientista e matemático francês que fez importantes contribuições para o estudo do eletromagnetismo, o André Marie Ampère (1775-1836). Fundamentado nos resultados de Oersted, Ampère publicou em 1827 a obra *Teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos deduzida da experiência*. Nessa obra, Ampère descreveu os efeitos observados por Oersted, tomando como hipótese uma interação newtoniana entre os elementos de corrente.

Ampère idealizou um eletroímã, denominado como solenoide, demonstrando que um fio enrolado numa espiral teria o mesmo comportamento que um imã comum, desde que sobre ele fosse produzida uma corrente (CHERMAN, 2005). Ainda, foi Ampère quem cunhou o termo *Eletrodinâmica* para estudos relativos à ação mútua entre correntes. Em 1825, Ampère inventou o *galvanômetro*, um aparelho utilizado para mensurar correntes elétricas.

O físico e matemático alemão, Georg Simon Ohm (1789-1854), foi outro nome de destaque na histórica da eletricidade e magnetismo. Ele formou-se como professor de Física experimental na Universidade de Munique em 1852, e suas primeiras teorias começaram a ser formuladas entre os anos de 1826 e 1827.

Utilizando o galvanômetro, Ohm introduziu matematicamente o conceito de diferença de potencial (VÁLIO et al., 2016). Ele propôs que a corrente elétrica I, que surge em um circuito, é diretamente proporcional à voltagem U fornecida ao circuito. A constante R de proporcionalidade foi definida como a resistência elétrica do circuito. Isso é representado matematicamente como:

$$U = R \cdot I$$

Ohm foi além, estabelecendo relações entre comprimentos, espessuras e tipos de fios com a resistência elétrica. Com essas buscas, Ohm formula a sua segunda lei: "A resistência elétrica R de um condutor homogêneo de seção transversal uniforme é proporcional ao seu comprimento ℓ, inversamente proporcional à área de sua seção transversal A e depende do

material e da temperatura" (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2010, p. 121). Em notação matemática:

$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{A}$$

Em que ρ é a *resistividade elétrica*, que é baixa para bons condutores. Dessa forma, Ohm estabeleceu que a magnitude da corrente em um circuito galvânico é diretamente proporcional à soma das tensões e inversamente proporcional ao comprimento reduzido total do circuito.

Em 1820, Oersted havia descoberto que correntes elétricas geravam campos magnéticos. Em 1831, Michael Faraday (1791-1867) descobriu o processo inverso: correntes elétricas poderiam ser geradas por meio de campos magnéticos variáveis (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2010). Tal descoberta pautou-se na observação de que ao deslocar um imã nas proximidades de um fio produzia-se uma corrente elétrica nesse fio (PIRES, 2011).

Faraday é considerado um dos maiores físicos experimentais de todos os tempos, sendo responsável por diversas descobertas, como a da decomposição química a partir da corrente elétrica (eletrólise), a conclusão de que os átomos estariam, de certa forma, associados à eletricidade, o fornecimento da primeira prova satisfatória de conservação de carga elétrica, e inventou o dínamo, um instrumento constituído por um imã fixo em um eixo móvel, de modo que ao redor desse eixo existe um fio condutor constituindo espiras e, assim, formando uma bobina, capaz de transformar energia mecânica em energia elétrica. Essa é a origem dos motores e geradores elétricos que utilizamos hoje!

Dentre seus grandes feitos destacamos, ainda, a enunciação da lei da Indução Magnética, em que introduziu o conceito de linhas de força de um campo magnético. Vale destacar que essa lei foi descoberta experimentalmente por Faraday na Inglaterra, em 1831 e, de maneira independente, na mesma época foi descoberta por Joseph Henry (1797-1878), nos Estados Unidos e, por isso, a unidade do SI de indutância é denominada de *Henry* (***H***) (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017). A Lei de Faraday ou Lei da Indução Magnética é enunciada como: "A intensidade da força eletromotriz induzida em um circuito é igual à taxa com que o fluxo magnético que o atravessa varia com o tempo" (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2017, p. 229). Em termos matemáticos:

$$|\varepsilon| = \left|\frac{d\Phi_B}{dt}\right|$$

Em que ε é a força eletromotriz induzida no condutor e $d\Phi_B$ é a variação do fluxo indutor durante o intervalo de tempo dt. Assim, Faraday assentou as bases para a construção de indutores e transformadores elétricos, fundamentais nos dias de hoje para os sistemas elétricos.

Pesquise mais

Saiba mais sobre as grandiosas descobertas de Faraday lendo o artigo *Uma abordagem histórico-filosófica para o Eletromagnetismo no Ensino Médio*, páginas 236-240. Contudo, a leitura do artigo na íntegra te proporcionará maiores informações sobre a história do Eletromagnetismo. Você pode fazer o download do artigo por meio do link disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6433>. Acesso em: 13 jun. 2018.

Desejando demonstrar experimentalmente que o campo elétrico é nulo no interior de um condutor eletrizado, Faraday construiu, em 1836, uma grande caixa composta por telas metálicas condutoras e isolou-a da terra. Entrou na caixa munido de diversos dispositivos de detecção da presença de campos elétricos e solicitou a seus assistentes que eletrizassem a caixa intensamente. O resultado foi que nenhum dispositivo acusou a existência de campo elétrico dentro da caixa e, ainda que a caixa estivesse altamente eletrizada, Faraday nada sentiu. A caixa recebeu o nome de *Gaiola de Faraday* (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2010).

Exemplificando

Em sala de aula, ao inserir o contexto histórico sobre essa criação, o professor de Física poderá aproveitar esse momento para abordar algumas curiosidades relacionadas às aplicações da Gaiola de Faraday, discutindo com os alunos o fato de estarmos protegidos dentro de carros e aviões quando ocorrem tempestades com descargas elétricas, destacando que no caso eles funcionam de maneira similar a uma Gaiola de Faraday.

Os trabalhos de Faraday impressionaram William Thomson (1824-1907), o lorde Kelvin, o qual em 1841 deu um tratamento matemático adequado ao conceito de linhas de força de Faraday e fez com que as ideias de Faraday chegassem ao conhecimento de James Clerck Maxwell (1831-1879), considerado o pai do Eletromagnetismo.

Antes de abordarmos a respeito de Maxwell, vale destacar que em 1846, Wilhelm Weber (1804-1890) propôs uma expressão para relacionar duas cargas elétricas em movimento que dependia não apenas da posição das cargas, como afirmava Coulomb, mas também de suas velocidades relativas e aceleração (PIRES, 2011).

Maxwell tinha grande afinidade com o Cálculo e com as ideias mais recentes sobre eletricidade e magnetismo, e foram tais conhecimentos que permitiram as formulações das famosas equações de Maxwell, ainda que ele não as tenha formulado sozinho.

O que há de comum entre as quatro equações é que elas relacionam o campo elétrico ($\vec{E}$) e o campo magnético ($\vec{B}$), em conjunto com suas variações no espaço (∇) e no tempo $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)$, além de densidade de carga elétrica (ρ) e densidade de corrente elétrica (J). Cuidado! Note que utilizamos mesmo símbolo (ρ) para representar conceitos distintos, a densidade de carga elétrica e a resistividade elétrica.

A primeira equação é uma aplicação direta do teorema da divergência, proposto por Karl Friedrich Gauss (1777-1855), que diz que é possível determinar a "forma" de um campo vetorial utilizando uma superfície fechada ideal que contivesse o que estivesse gerando o campo. A primeira equação de Maxwell, denominada *de Lei de Gauss para o campo elétrico*, é representada por:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

Em que ρ é a densidade de cargas elétricas e ε_0 é a permissividade do campo elétrico.

A segunda Lei de Maxwell, denominada de *Lei de Gauss para o campo magnético*, expressa que a conservação do fluxo magnético, de modo que todo o fluxo magnético que entra em um volume é igual ao que sai. Em termos matemáticos, temos:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

A terceira equação de Maxwell, denominada de *Lei de Faraday-Lenz* por fundamentar-se em ideias de ambos os físicos, expressa como a corrente elétrica produz campo magnético. Em termos matemáticos, temos:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

A quarta equação de Maxwell baseia-se em pressupostos de Ampère sobre corrente elétrica causar efeitos magnéticos e, por isso, é denominada por *Lei de Ampère-Maxwell*, e descreve como variações de campo magnético produzem campos elétricos. Em termos matemáticos, temos:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Em que $\vec{J}$ é a corrente e em que ε_0 e μ_0 são, respectivamente, a permissividade e a permeabilidade do meio em que os campos elétrico e magnético se propagam. Vale destacar que o segundo termo do lado direito da equação foi a contribuição original de Maxwell, que finalizou a formulação do Eletromagnetismo Clássico.

Pesquise mais

Saiba mais sobre Maxwell e suas contribuições para o Eletromagnetismo lendo a página 487 do livro *Física Conceitual*. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582603413/cfi/512>. Acesso em: 13 jun. 2018.

Além disso, acessando a página disponível no link indicado a seguir, você conhecerá outros grandes nomes das teorias relacionadas à eletricidade e magnetismo, como os de Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) e muitos outros. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/eletromagnetismo/material-suplementar/historia-do-eletromagnetismo/>. Acesso em: 13 jun. 2018.

Sem medo de errar

Considerando o contexto histórico do Eletromagnetismo e objetivando possibilidades de transposição do contexto histórico para aulas de Física no Ensino Médio, você e os professores de Física de escolas da região, participantes do curso do Núcleo de Educação Regional, decidiram elaborar uma proposta experimental.

Um experimento que poderia ser proposto para aulas de Física no Ensino Médio, de modo a contemplar aspectos históricos do Eletromagnetismo poderia ser reproduzir o experimento realizado por Oersted, uma vez considerado como um dos principais responsáveis por impulsionar as pesquisas em busca de evidências sobre relações entre eletricidade e magnetismo.

Após propor pesquisas e discussões aos alunos do Ensino Médio, mais especificamente a alunos do 3º ano, visando que os mesmos conheçam a história da eletricidade e do magnetismo, bem como reconheçam a importância dos estudos desenvolvidos por Oersted para dar início ao estabelecimento de relações entre eletricidade e magnetismo, o professor de Física poderia propor aos alunos a reprodução de um dos experimentos realizados por esse físico. Tal experimento foi realizado por Oersted com o objetivo de confirmar suas ideias sobre correntes elétricas produzirem ao seu redor uma região de influência magnética. Nesse contexto, é importante que o professor enfatize que o experimento não é exatamente realizado da mesma forma que Oersted realizou, mas que possibilita compreender o mesmo fenômeno observado por ele no experimento original.

Para realizar tal proposta experimental, primeiro os alunos precisariam construir uma bússola. Para isso, poderiam utilizar um imã, um lápis, dois copos de vidro de mesma altura, uma agulha de costura e linha de costura. O primeiro passo consiste em esfregar sobre a agulha um dos polos do imã várias vezes, na mesma direção e sentido. Em seguida, amarrar a extremidade de um pedaço de linha de costura no ponto médio da agulha, ajustando a posição do nó para que a mesma fique posicionada na horizontal. Amarrar a outra extremidade da linha no ponto médio do lápis, o qual precisa ser apoiado nos dois copos, tal como ilustra a Figura 3.8.

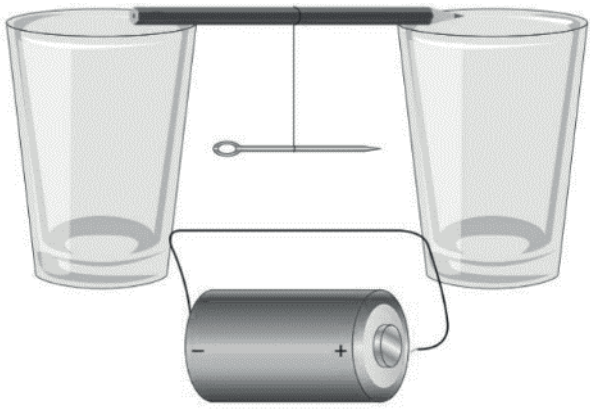
Figura 3.8 | Construção de bússola

Fonte: Bonjorno et al. (2016, p. 139).

Dessa forma, os alunos poderiam observar a agulha se orientando em uma única direção e, se o experimento tiver dado certo, após movimentar a agulha, ela buscará retornar à posição inicial.

Em seguida, para dar início à reprodução do experimento de Oersted, os alunos poderiam acrescentar à bússola uma pilha de 1,5 V, 30 cm de fio elétrico com extremidades descascadas e fita adesiva, da seguinte forma: utilizando a fita adesiva, fixar uma das extremidades do fio elétrico ao polo negativo da pilha, de maneira que o fio fique paralelo e abaixo da agulha, conforme ilustra a Figura 3.9.

Figura 3.9 | Reprodução do experimento de Oersted



Fonte: Bonjorno et al. (2016, p. 145).

A extremidade livre do fio será colocada em contato com o polo positivo da pilha por um breve instante de tempo. Com isso, os alunos poderiam ser orientados a observarem o que acontecerá com a pilha nesse procedimento.

A partir desse experimento, os alunos poderiam ser conduzidos a discutirem sobre as conclusões do experimento, comparando tais conclusões com as ideias de Oersted, conforme estudadas nas pesquisas e discussões históricas realizadas antes da proposta experimental. Dessa forma, espera-se que os alunos percebam que as correntes elétricas, tal como a corrente que atravessa o fio no experimento, são capazes de gerar uma região de influência magnética, denominada de campo magnético, e que é a presença deste faz com que a agulha sofra deflexão. É importante que os alunos utilizem corretamente a regra da mão direita para prever a direção na qual a agulha será defletida.

O professor ainda poderia aproveitar o experimento para discutir o motivo pelo qual o contato do fio elétrico com o polo positivo da pilha deve ser breve, de modo a conduzi-los à resposta de que, no experimento, o fio está causando um curto-circuito na pilha, e que o contato mais prolongado provocaria o superaquecimento e a descarga da pilha.

Com a proposta experimental apresentada, além de permitir aos alunos compreender o contexto histórico da descoberta das relações entre eletricidade e magnetismo, que mais tarde culminou no Eletromagnetismo, eles terão a oportunidade de "vivenciar o espírito investigativo de um cientista" (BONJORNO et al., 2016, p. 322), levantando hipóteses, realizando observações e formulando perguntas e respostas para os fenômenos observados. Lembre-se de que o professor de Física tem um papel muito importante nesse processo, tanto para conduzir a proposta experimental, quanto para promover no aluno o interesse e a curiosidade para compreender os fenômenos observados de modo a trilhar os passos de Oersted, de acordo com o contexto histórico.

Avançando na prática

A garrafa de Leyden

Descrição da situação-problema

Suponha que você é um professor de Física do 3º ano do Ensino Médio e que, ao abordar o tema capacitores, contemplando os aspectos históricos relacionados à invenção do dispositivo capaz de armazenar carga elétrica, a *garrafa de Leyden*, um de seus alunos mencionou que não conseguia imaginar como seria possível esse dispositivo acumular cargas elétricas. Que estratégia metodológica você poderia adotar de maneira a auxiliar o aluno a compreender esse procedimento e, ao mesmo, contemplar aspectos históricos relativos a essa abordagem?

Resolução da situação-problema

Considerando as dificuldades apresentadas pelo aluno, uma das estratégias metodológicas que você poderia adotar é uma proposta experimental de construção de uma garrafa de Leyden (BONJORNO et al., 2016). Dessa forma, o aluno poderia visualizar os fenômenos envolvidos no processo de armazenamento de cargas elétricas na garrafa de Leyden, de maneira análoga ao que Musschenbrook realizou por volta de 1745.

Para isso, os alunos precisariam de um pequeno tubo de plástico ou vidro com tampa, um colchete de prender papel, uma esponja de aço, um pedaço de papel alumínio, um pedaço de fio elétrico fino e descascado em suas extremidades, um canudo de plástico, fita adesiva e um pedaço de papel toalha. Para montar o experimento, é necessário cortar duas fitas de papel alumínio de altura pouco menor que a do recipiente e de comprimento suficiente para dar uma volta e meia sobre o mesmo recipiente. Tais fitas servirão para revestir externa e internamente o recipiente, utilizando pedaços de fita adesiva para fixa-las. O interior do recipiente será preenchido até a metade por esponja de aço e a tampa do recipiente deverá ser perfurada com o colchete, abrindo, em seguida, as extremidades deste. Sobre o recipiente, as extremidades inferiores do colchete deverão tocar na esponja de aço. O canudo plástico deverá ser esfregado no papel toalha e, segurando o recipiente pela parte

externa, encostar o canudo eletrizada na extremidade superior do colchete. Dessa forma, a garrafa de Leyden será carregada e, para descarrega-la, será necessário ligar uma das extremidades do fio elétrico à lâmina externa, aproximando a outra extremidade do fio ao colchete. Nesse processo, será observada uma faísca entre o fio e a extremidade superior do colchete.

A partir desse experimento, você poderia promover discussões articuladas à fatos históricos, de modo a conduzir os alunos à compreensão do funcionamento da garrafa de Leyden. Além disso, o momento pode ser oportuno para relacionar a faísca produzida no experimento com os relâmpagos que observamos em dias de tempestades, aproveitando para trazer à tona aspectos históricos sobre as descobertas de Benjamin Franklin.

Acessando o vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=xFZ8mbHRSto> (acesso em: 9 jul. 2018), você encontrará maiores informações sobre como construir o experimento da garrafa de Leyden.

Avançando na prática

1. Oersted realizou um experimento utilizando o fio de um circuito passando sobre a agulha de uma bússola, experimento este que o conduziu a valiosas contribuições para a Física, pois observou evidências que indicavam relações entre a eletricidade e o magnetismo, que mais tarde culminou em suas junções no Eletromagnetismo.
Considerando esse experimento realizado por Oersted, analise as afirmativas a seguir:

I. Oersted evidenciou que a corrente elétrica constituída no circuito originou um campo magnético de direção perpendicular em relação à corrente, que provocou uma deflexão na agulha da bússola.
II. Oersted evidenciou que a corrente elétrica constituída no circuito não interferiu na posição inicial da agulha da bússola.
III. A partir do fenômeno observado, Oersted formulou a primeira lei do eletromagnetismo, estabelecendo a relação matemática entre eletricidade e magnetismo.

Assinale a alternativa que apresenta as afirmativa(s) correta(s):
a) Somente I e II.
b) Somente I e III.

c) Somente I.
d) Somente II.
e) Somente III.

2. Considerando o desenvolvimento histórico da eletricidade e do magnetismo, analise as afirmativas a seguir e julgue cada uma delas como verdadeira (V) ou falsa (F):

( ) William Gilbert foi quem realizou as primeiras descobertas a respeito do magnetismo, partindo da análise da atração entre pedras do minério magnetita.
( ) A relação entre magnetismo e eletricidade foram verificadas experimentalmente apenas no século XX, por Michael Faraday.
( ) Franklin foi quem estabeleceu as primeiras ideias sobre sinais para representar perdas ou ganhos em cargas elétricas, estabelecendo o sinal positivo para o primeiro caso, e o sinal negativo para o segundo.
( ) As conclusões de Oersted foram um marco inicial para a história do Eletromagnetismo, pois proporcionou primeiras evidências sobre relações entre eletricidade e magnetismo.
( ) Volta, ao inventar a pilha voltaica, abriu novos rumos para a pesquisa elétrica e química.

Assinale a alternativa que apresenta a relação correta, respectivamente:
a) V, F, V, F, V.
b) F, F, F, V, F.
c) F, V, V, F, F.
d) V, F, V, F, V.
e) F, F, V, V, V.

3. Em uma aula de Física, o professor propôs a um dos alunos que embrulhasse seu celular ligado em várias camadas de alumínio e solicitou a outro aluno que realizasse uma ligação para o celular embrulhado. O aluno que realizou a ligação recebeu uma mensagem de que o telefone para o qual ligou estava desligado ou fora da área de serviço.
Com essa proposta, o professor poderia associar contextos da história da Física, enfatizando:

I. As descobertas de Joseph Priestley (1733-1804) sobre o interior de uma esfera oca e eletrizada não existir força elétrica, fazendo uma analogia entre a esfera e o embrulho de alumínio e o aparelho de celular como

o equipamento eletrizado no interior da esfera, sobre o qual não haverá evidência de força elétrica.

II. Os pressupostos de André Marie Ampère (1775-1836) a respeito de que, em qualquer corpo, correntes elétricas estão orientadas aleatoriamente em todas as direções, de modo a se anularem entre si, tendo sido tal situações apenas idealizada e não comprovada experimentalmente por ele. O experimento com o celular e papel alumínio poderia ser entendido como uma experimentação para verificar tal enunciação, em que o embrulho no alumínio delimitaria em seu interior uma região ideal, em que as correntes elétricas se anulam, provocando a falta de sinal no celular.

III. As ideias de Michael Faraday (1791-1867) sobre o campo elétrico ser nulo no interior de um condutor eletrizado, de modo que o embrulho com papel alumínio pode ser caracterizado como uma blindagem eletrostática.

Pode-se considerar como abordagem(ns) histórica(s) pertinente(s) para explicar o experimento realizado a(s) afirmação(ões):

a) I.
b) II.
c) III.
d) I e III.
e) II e III.

Referências

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. **Física, 3**. São Paulo: Saraiva, 2010.

BONJORNO, J. R. et al. **Física**: eletromagnetismo e física moderna. 3. ed. São Paulo: FTD, 2016.

CHERMAN, A. **Sobre os ombros de gigantes:** uma história da física. 2. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2005.

DIAS, P. M. C. **F**=m**a**?!! O nascimento da lei dinâmica. **Revista brasileira de ensino de Física**, v. 28, n. 2, p. 205-234. 2006.

DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V. **Física, 1**. São Paulo: Saraiva, 2010.

DUGAS, R. **A History of Mechanics**. New York: Dover Books, 2011.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física 3**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

LA COTARDIÈRE, P. **História das ciências**: da antiguidade aos nossos dias. v.1. Lisboa: Edições Texto & Grafia, 2010.

LA PENHA, G. M. S. M. **Sobre as histórias da história da mecânica do século XVII**. Rio de Janeiro: LCC/CNPq/IM-UFRJ, 1982. Disponível em: <https://revista.enap.gov.br/index.php/RSP/article/viewFile/2261/1180>. Acesso em: 27 maio 2018.

MARTÍNEZ, A. T. **Series de Taylor y Series de Fourier:** un estudio comparativo. 2015. Trabalho de Finalização de Graduação (Curso de Matemática) – Departamento de Análisis Matemático, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Espanha.

PATY, M. A gênese da causalidade física. **Scientiae Studia**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 9-32, 2004.

PATY, M. O elemento diferencial de tempo e a causalidade física na dinâmica de D'Alembert. **Discurso**, Departamento de Filosofia da USP, 2005, p.167-216. Disponível em: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00190005/document>. Acesso em: 27 maio 2018.

PIRES, A. S. T. **Evolução das ideias da física**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física: 2011.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física, v. 2**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

ROONEY, A. **A História da Física.** São Paulo: M. Books do Brasil Editora Ltda, 2013.

SILVA, A. P. B.; MARTINS, R. A. Maupertuis e o princípio mecânico de ação mínima: uma análise crítica. **Revista brasileira de ensino de Física**, v. 29, n. 4, 2007, p. 625-633.

UTFPR. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 2013. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/fandrade/teaching/files/histrico_v2.pdf>. Acesso em: 27 maio 2018.

VÁLIO, A. B. M.; et al. **Ser protagonista:** física, 3º ano. 3. ed. São Paulo: Edições SM, 2016.

A Física dos séculos XX e XXI

Convite ao estudo

Indo além das teorias clássicas, entre os séculos XIX e XX algumas novas teorias começaram a ser construídas de modo que revolucionaram completamente os estudos da Física, buscando contemplar desde explicações para fenômenos tanto do mundo macroscópico quanto do mundo microscópico. Sobretudo no final século XIX, discussões propostas pela Teoria da Relatividade e pela Mecânica Quântica transformaram a percepção de mundo e possibilitaram muitos avanços em diversos segmentos, como: a elaboração de sensores com efeito fotoelétrico, que permitem a abertura e o fechamento automático de portas e, até mesmo, a criação do sistema de produção de energia elétrica a partir da luz solar; construção de instrumentos médicos, como os tomógrafos por emissão de pósitrons que permitem diagnosticar o câncer; desenvolvimento de tecnologias de irradiação de alimentos para desinfetá-los e melhorar a qualidade de produtos alimentícios; o sistema de GPS funciona graças aos desenvolvimentos da relatividade; computadores dependem da mecânica quântica; LEDs trazem iluminação com baixíssimo consumo de energia elétrica; dentre muitos outros exemplos.

Nesta unidade, seja bem-vindo a um dos períodos mais revolucionários da História da Física e aproveite para conhecer maneiras de transpor conhecimentos sobre a Física Moderna em sua futura prática docente, segundo uma abordagem histórica. Para isso, no decorrer desta unidade, você estará o papel de um professor de Física que acaba de assumir a direção de uma escola particular que precisa, com urgência, melhorar o índice de aprovação de seus alunos em exames de vestibular.

Assim, sua primeira ideia para melhorar esses índices, como novo diretor, foi desenvolver palestras sobre os mais diversos temas. Como um teste, você mesmo decidiu apresentar as primeiras palestras e selecionou a temática de Física Moderna e os alunos do 3º ano do Ensino Médio, com o objetivo de estimular a curiosidade e o interesse desses estudantes pela disciplina de Física e melhor prepará-los para as provas de vestibulares que se aproximam. Nessas palestras, você deverá destacar o desenvolvimento histórico das principais descobertas e dos principais avanços da Física nos séculos XIX, XX e XXI, auxiliando os estudantes a refletirem a respeito de como os conhecimentos físicos foram promovidos nesses períodos. Você organizou as palestras em três grandes temas: o primeiro tema é Relatividade e suas consequências; o segundo, Mecânica Quântica; e, por fim, você abordará os principais avanços recentes da Física. Nessas palestras, você buscará ir além de explicações verbais, organizando de maneira didática e buscando integrar, sempre que possível, os estudantes em suas discussões e, para isso, recorrerá a vídeos, animações, pesquisas, entre outros, para tornar suas apresentações mais interessantes. Como você poderia organizar e conduzir suas palestras sob essa perspectiva e abordagem?

Para que você esteja preparado a organizar suas palestras, na primeira seção, você estudará a incompatibilidade da Mecânica Clássica e o Eletromagnetismo, o desenvolvimento dos conceitos de relatividade (geral e restrita), bem como suas implicações. Na segunda seção, você conhecerá os primórdios da Mecânica Quântica, conhecendo os problemas na termodinâmica clássica e a solução pela quantização da energia, bem como a estrita relação entre Física e Química nesse período. Por fim, na terceira seção, você estudará a teoria quântica de campos, a física de partículas, e outros avanços mais recentes da Física como da supercondutividade, da física nuclear e aplicações da Física na computação.

Desejo a você bons estudos!

Seção 4.1

Relatividade e suas consequências

Diálogo aberto

Segundo estudos da Mecânica Clássica, já sabemos que a velocidade é uma grandeza relativa, ou seja, depende do referencial em relação ao qual é determinada. Já grandezas como comprimento, tempo e massa são consideradas como absolutas, ou seja, não dependem do referencial a partir dos quais são medidas. Afinal, afirmar que o comprimento de um trecho de uma estrada, o tempo de duração de seu filme favorito ou sua massa dependem de um referencial parece absurdo. Contudo, ao estudar situações em que as velocidades são extremamente elevadas, próximas à velocidade da luz, evidencia-se que essas grandezas também são relativas.

E você faz ideia de como surgiram ideias tão revolucionárias como essas? Ou quais são os principais estudiosos responsáveis por descobertas como essas? Ou, ainda, quais foram os impactos dessas descobertas para a sociedade?

Para responder a esses e outros questionamentos, nesta seção, você será um professor de Física que acaba de assumir a direção de uma escola de Ensino Médio, e que precisa, com urgência, melhorar o índice de aprovação de seus alunos em exames de vestibular. Para isso, decidiu ministrar palestras para alunos do 3º ano do Ensino Médio da escola em que leciona. Nessas palestras, o objetivo é apresentar aspectos históricos da Física Moderna, visando estimular a curiosidade e o interesse dos estudantes pela disciplina de Física e melhor prepará-los para as provas de vestibulares que se aproximam.

Dando início à sua palestra, você contemplará temáticas relacionadas à Relatividade e suas aplicações, destacando seu contexto histórico. Considerando que Einstein é um nome muito famoso na área da Física Moderna, você decidiu iniciar sua palestra com abordagens históricas sobre ele, destacando o desenvolvimento de suas ideias sobre o universo relativístico. Enquanto você explicava sobre o desenvolvimento histórico da ideia sobre a dilatação do tempo, percebeu que alguns alunos não estavam compreendendo muito bem suas explicações.

De que maneira você poderia auxiliar os alunos a compreenderem a teoria de Einstein a respeito da dilatação do tempo e da contratação e curvatura do espaço, compreendendo, ao mesmo tempo, abordagens históricas da Física?

Para lidar com esse desafio, nesta seção, você conhecerá as situações que motivaram o desenvolvimento da Física Moderna, conhecendo os principais aspectos que evidenciaram incompatibilidade entre a Mecânica Clássica e o Eletromagnetismo. Conhecerá, ainda, que as primeiras ideias sobre relatividade surgiram muito antes de Einstein existir, em que ideias sobre o assunto já haviam sido propostas por Galileu. Estudará, também, os principais episódios históricos atrelados ao desenvolvimento da relatividade restrita e geral por Einstein e as suas consequências, sobretudo, para a cosmologia.

Preparado para encarar esse desafio? Então vamos adentrar a fascinante história da Física Moderna. Bons estudos!

Não pode faltar

Da Física Clássica à Física Moderna

Albert Einstein (1879-1955), considerado um dos maiores físicos da história, nasceu em Ulm, na Alemanha, e as teorias físicas que desenvolveu marcaram consideravelmente a Física Moderna.

Voltando um pouco no tempo, Galileu Galilei (1564-1642) já havia sugerido que todas as leis físicas eram as mesmas seja qual fosse o estado de movimento de um corpo, desde que a velocidade permanecesse constante. Assim, Galileu já havia proposto as primeiras ideias sobre relatividade e, para entendermos sua concepção, podemos imaginar a seguinte situação: uma pessoa em repouso sob o convés de um navio à uma velocidade constante, observaria uma pedra lançada do mastro caindo em linha reta, a mesma observação que teria sobre o lançamento dessa pedra caso o navio estivesse parado. Segundo Galileu, tal observação era comum nas duas situações (navio em movimento constante ou parado), porque o movimento do navio seria comum a todas as coisas nele contidas. Nesse sentido, o princípio da relatividade de Galileu era aplicável a qualquer tipo de fenômeno, ou seja, qualquer referencial inercial seria completamente equivalente e deveria descrever as mesmas leis mecânicas (MUNIZ, 2015). Quanto ao tempo e ao comprimento, na ideia de relatividade de Galileu, ambas

as grandezas eram consideradas como absolutas e, portanto, seriam independentes do referencial onde são medidos.

De certa forma, concepções newtonianas convergiam com as ideias de relatividade de Galileu, uma vez que tempo e comprimento também eram tidas como grandezas absolutas, assim como a massa. Assim sendo, conclui-se que a força resultante, $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, também seria absoluta e, portanto, sendo as leis de Newton idênticas e aplicáveis a todos os referenciais inerciais.

Contudo, as ideias relativísticas de Galileu e Newton, assim, como outras da Física Clássica (a qual já estava bem estabelecida em meados do século XIX, composta pela Mecânica, Termodinâmica e Eletromagnetismo) eram limitados e só pareciam ter validade na Mecânica, não servindo para explicar, principalmente, alguns fenômenos do Eletromagnetismo.

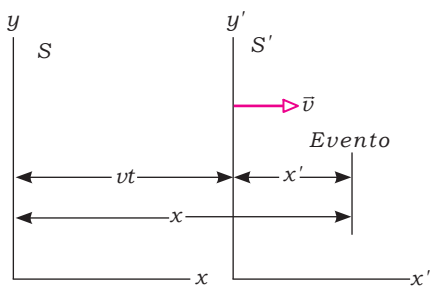
Segundo Galileu, para dois referenciais *S* e *S'* temos as seguintes transformações:

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

Em que *S'* desloca-se com velocidade *v* no sentido positivo de *x'* com relação ao referencial *S*.

Para melhor compreender essas transformações, considere a Figura 4.1:

Figura 4.1 | Dois referenciais inerciais: o referencial S' está se movendo com velocidade v em relação ao referencial S



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 160).

A figura mostra apenas os eixos x e y, e é importante notar que x' varia com o tempo, conforme a equação da primeira linha da chave. Entretanto, y' é igual a y em todos os instantes, dado que não há movimento relativo no sentido do eixo y, e o mesmo ocorre para o eixo z que não está representado na figura, o que explica a segunda e terceira equações. A quarta equação corresponde aos intervalos de tempo que são iguais nos dois referenciais (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

É sobretudo no Eletromagnetismo que se evidenciam inconsistências em relação ao princípio relativístico de Galileu. Nesse campo de estudos da Física, sabe-se que, segundo as equações de Maxwell, as ondas eletromagnéticas apresentam uma velocidade de propagação no vácuo que é uma constante universal c dependente de constantes elétrica (ε_0) e magnética (μ_0), como apresentado na equação a seguir:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

Em que o valor de *c* equivale a aproximação de 300.000.000 m/s, cujo valor exato definido segundo o Sistema Internacional (SI) é 299.792.458 m/s. Como a velocidade da luz é mais fundamental do que a própria definição de metro ou segundo, optou-se por definir um valor exato para *c* e ajustar as outras definições de acordo.

Tal situação intrigou físicos do século XIX. Afinal, o valor constante $c \approx 3 \cdot 10^8 m/s$, como velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, determinado por James Clerk Maxwell (1831-1879), deveria ser medido em relação a que, ou em qual referencial? Afinal, segundo a relatividade de Galileu, a velocidade constante do observador inercial deveria ser somada ao movimento observado, no caso, a propagação da luz. No período, havia a hipótese de que existiria um meio fluído rarefeito, sem viscosidade e que preencheria todo o espaço, que recebeu no nome de éter, por meio do qual as ondas eletromagnéticas se propagavam. Os cientistas da época acreditavam que a velocidade *c* determinada por Maxwell deveria ter sido medida em relação ao éter, o qual caracterizaria um referencial privilegiado, no qual as ondas eletromagnéticas teriam velocidade *c* (BONJORNO et al., 2016).

Na tentativa de provar a existência do éter, destaca-se na História da Física o experimento realizado pelos físicos norte-americanos, Albert Abraham Michelson (1852-1931) e Edward Williams Morley (1838-1923). O experimento Michelson-Morley foi realizado em 1887, e tinha

por objetivo comprovar a existência do éter medindo a velocidade de deslocamento da Terra em relação a esse meio, o qual acreditava-se estar em repouso no Universo.

Pesquise mais

O experimento Michelson-Morley utilizou um interferômetro, aparelho que provoca interferência luminosa. Para saber como esse experimento foi realizado e saber mais sobre esse episódio da História da Física, veja o vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=MxSXh62pTm8>. Acesso em: 24 jun. 2018. Você também pode ler o artigo *Construção* de um interferômetro de *Michelson-Morley* com materiais de baixo custo (páginas 177-181), disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/download/5691/pdf>. Acesso em: 24 jun. 2018.

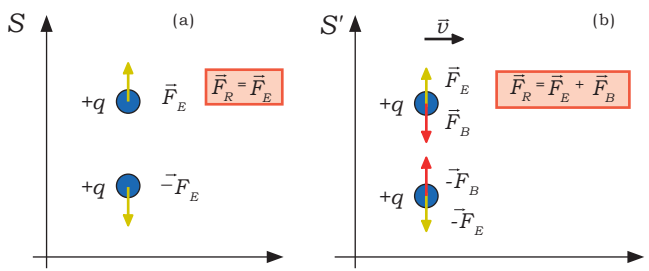
O experimento Michelson-Morley deu subsídios para o abandono da teoria do éter e do referencial absoluto. Mostrou também que as ondas eletromagnéticas não necessitam de meio material para se propagar e que, no vácuo, a velocidade da luz é a mesma em todas as direções.

Exemplificando

Para exemplificar a incompatibilidade da Mecânica Clássica e o Eletromagnetismo, pode-se considerar as seguintes situações:

(a) duas partículas de mesma carga elétrica, em repouso em relação a um referencial S. Nessa situação, evidencia-se que as duas partículas vão se repelir, originando a força de repulsão eletrostática, conforme ilustra a Figura 4.2.

Figura 4.2 | Cargas elétricas em repouso observadas por diferentes referenciais inerciais



Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/tool/print/index.php?id=504254>. Acesso em: 24 jun. 2018.

(b) as mesmas partículas, observadas em um referencial S' com movimento relativo ao primeiro, apresentam uma velocidade v na direção horizontal. Dessa forma, sabemos que um observador no referencial S' notará a produção de campos magnéticos, que não podem ser observados por um observador no primeiro referencial. Inclusive, no referencial S', observa-se que as partículas se atraem com uma força eletromagnética.

Assim, evidencia-se uma violação do princípio da equivalência dos referenciais inerciais de Galileu e Newton, pois a força resultante observada em cada partícula seria diferente nos dois referenciais. É claro que o valor da diferença só seria relevante para velocidades muito elevadas, da ordem da velocidade da luz, mas há uma inconsistência evidente entre as leis da Mecânica Clássica e do Eletromagnetismo, que precisou ser resolvida por Einstein.

O experimento Michelson-Morley foi muito importante para que a comunidade científica da época aceitasse as teorias que seriam formuladas por Einstein.

Reflita

O escritor e bioquímico americano, Isaac Assimov (1920-1992), qualificou o experimento Michelson-Morley como *o mais importante experimento que não deu certo de toda a história da ciência*. A que se deve essa afirmação?

Einstein e a Relatividade

Albert Einstein, quando ainda era um jovem estudante de Física, já se intrigava com a incompatibilidade entre a Mecânica Newtoniana e as equações de Maxwell. Porém, grande parte de suas obras científicas foram desenvolvidas no período de 1902 a 1909, quando trabalhava no Departamento de Patentes da Suíça. Dentre suas obras, em 1905, quando tinha 26 anos de idade, ele publicou o artigo intitulado *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*. Nesse artigo, Einstein "mostrou que as leis de Maxwell podem ser, da mesma forma que as leis de Newton, interpretadas como independentes do estado de movimento de um observador" (HEWITT, 2008). Contudo, segundo ele haveria um custo, que seria uma revolução total no modo como até então eram compreendidos o espaço e o tempo.

No mês seguinte, Einstein publicou outro artigo que lhe garantiu a entrada no doutorado pela Universidade de Zurique e, ainda em 1905, conhecido como o "ano miraculoso" de Einstein, em que ele publicou mais quatro artigos em revistas de renome da época, sendo um desses quatro o artigo que revelou o que hoje conhecemos por *teoria especial (ou restrita) da relatividade* (BRENNAM, 2003). Além disso, dentre esses artigos estava um em que Einstein introduziu concepções sobre o *quantum* da luz, o que hoje denominamos por *fóton*, em que explicava o efeito fotoelétrico, o que lhe renderia um Prêmio Nobel alguns anos mais tarde. Ou seja, Einstein também deu início aos estudos da Mecânica Quântica. Nisso foi precedido apenas por Planck, mas seu artigo abre perspectivas ainda desconhecidas.

Tratando especificamente sobre o desenvolvimento da teoria especial (ou restrita) da relatividade, Einstein mostrou em sua obra que quando as forças entre cargas elétricas são afetadas pelo movimento, as medições de espaço e tempo também se alteram, pois também dependem do movimento relativo (HEWITT, 2008). Concluiu, ainda, que a velocidade da luz seria constante para qualquer observador, independentemente do seu movimento relativo (BRENNAM, 2003).

Ao propor a determinação uma reformulação no conceito de espaço e tempo, Einstein estabeleceu dois postulados que são considerados como os pilares da Teoria da Relatividade Especial (ou Restrita):

1° Postulado: "Movimento uniforme absoluto não pode ser detectado" (TYPLER; MOSCA, 2017, p. 147). Esse primeiro postulado é uma extensão da concepção de Newton, que afirma que as leis da Física são as mesmas para observadores em quaisquer sistemas de referências inerciais.

2° Postulado: "A velocidade da luz é independente do movimento da fonte" (TYPLER; MOSCA, 2017, p. 147). Esse postulado refere-se à velocidade da luz no vácuo ter o mesmo valor independentemente do movimento da fonte ou do sistema de referência do observador.

Assimile

Em outras palavras, podemos entender os dois postulados que baseiam a teoria de Einstein como:

- **"Postulado da Relatividade:** As leis da física são as mesmas para todos os observadores situados em referencias inerciais. Não existe um referencial absoluto" (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 147);

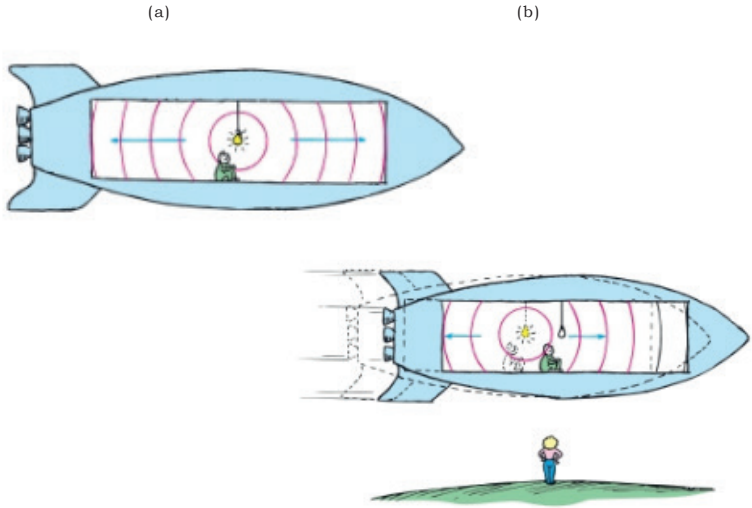
- **"Postulado da Velocidade da Luz:** A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c em todas as direções e em todos os referenciais inerciais" (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016, p. 147).

Os postulados formulados por Einstein proporcionaram consequências consideráveis e, para compreender alguns dos principais efeitos relativísticos, Einstein forneceu algumas situações de "experiências mentais". Dentre os principais efeitos relativísticos, podemos destacar: a relatividade da simultaneidade; a dilatação do tempo; a contração do comprimento; o aumento de massa de um corpo em movimento rápido; e, a relação entre massa e energia (BRENNAN, 2003).

A definição de simultaneidade estabelece que dois eventos são simultâneos quando são percebidos ou observados ao mesmo tempo, dependendo do referencial. Einstein mostra, no princípio relativístico, que eventos considerados simultâneos num dado referencial não serão simultâneos quando observados de outro referencial, pois o tempo não é absoluto e, assim, a medida do tempo será diferente para referenciais diferentes. Em resumo, a simultaneidade de eventos depende do referencial de observação.

Por exemplo, suponha uma fonte luminosa ligada bem no meio do compartimento de uma nave espacial (ver Figura 4.3(a)). Quando ligada, a luz se espalha em todas as direções com velocidade $c \approx 3 \cdot 10^8 m/s$. Do ponto de vista de um observador que viaja no interior desse compartimento, a luz viaja distâncias iguais até as duas extremidades do compartimento e, assim, há simultaneidade. Agora, considere a Figura 4.3(b), que ilustra a mesma situação, porém, considerando um observador externo, que constitui um novo referencial. Para este, a chegada da luz às extremidades frontal e traseira do compartimento da nave não caracterizarão eventos simultâneos. Por causa do deslocamento da nave para a direita, a luz atingirá a extremidade traseira antes de atingir a extremidade frontal (HEWITT, 2008). Vale destacar que do ponto de vista da Relatividade Restrita os dois observadores chegaram a conclusões corretas.

Figura 4.3 | Conceito de simultaneidade segundo (a) observador interno e (b) observador externo (desconsiderando por simplicidade a contração dos espaços)



Fonte: Hewitt (2015, p. 662)

Quanto ao efeito relativístico de dilatação do tempo, "se aceitarmos a constância da velocidade da luz, somos forçados a aceitar a relatividade do tempo" (MUNIZ, 2015, p.6), ou seja, o tempo marcado em um relógio seria afetado pelo movimento e pela gravidade, de modo que os ponteiros de um relógio em movimento avançariam mais lentamente se comparado a um relógio imóvel (BRENNAN, 2003). Os relógios podem ser extremamente precisos, mas ao comparar o que eles medem com o que outros relógios igualmente precisos medem, precisamos levar em consideração o movimento relativo entre eles.

O fator de variação é $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$, em que v é a velocidade do referencial em movimento com relação ao referencial parado, e c é a velocidade da luz. Como o denominador é um fator menor do que 1, γ será maior do que um. Com isso, temos que a dilatação do tempo deve ser:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$$

Em que Δt é o tempo observado e Δt_0 é o tempo medido por um relógio que acompanha o objeto em movimento.

A contração das distâncias será: $L = L_0 / \gamma$

Em que L é o comprimento observado e L_0 é o comprimento medido pela régua que se move junto com o próprio objeto em movimento. Ou seja, um objeto em velocidade próxima à da luz parecerá menor para um observador em repouso do que para um observador se movendo na mesma velocidade.

A seguir, temos as equações da relatividade de Einstein:

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \dfrac{vx}{c^2}\right) \end{cases}$$

Com essas equações, temos que, para um movimento relativo ao longo do eixo x, a posição se transforma de maneira similar à transformação de Galileu, apenas ajustada por um fator γ (que é próximo de 1 para baixas velocidades, afinal as duas teorias concordam no limite de baixas velocidades). A maior novidade, entretanto, é que o tempo medido também é afetado pelo movimento. Para baixas velocidades, γ tende a um e a fração ao lado de t vai para zero, portanto, retomamos a transformação de Galileu no limite de baixas velocidades.

Pesquise mais

Conheça mais sobre os efeitos relativísticos de contração do comprimento em velocidades próximas à da luz e do o aumento de massa de um corpo em movimento rápido lendo o livro *Gigantes da Física: uma história da física moderna através de oito biografias*, páginas 73 a 82. O livro está disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788537805992/cfi/6/20!/4/132/4@0:15.2>. Acesso em: 24 jun. 2018.

É importante também que você conheça as implicações matemáticas das transformações de Lorentz para os resultados da relatividade especial (ou restrita). Para isso, indico a leitura do artigo *A Teoria da Relatividade Especial de Einstein – uma luz no espaço e no tempo*, páginas 3 a 14, disponível em: <http://fics.edu.br/index.php/integraacao/article/download/541/589/>. Acesso em: 24 jun. 2018.

Tenho certeza que você conhece Einstein pela famosa expressão:

$$E = m \cdot c^2$$

Essa expressão foi publicada em 1905, no artigo intitulado *A inércia de um corpo depende de seu conteúdo de energia?*, e, por meio dela, Einstein evidencia a equivalência entre massa(m) e energia total relativística(*E*) de um corpo em movimento. Assim, Einstein introduzia a ideia de que uma pequena quantidade de massa contém uma grande quantidade de energia e, se fosse possível liberá-la controladamente, o mundo teria uma nova fonte de energia ou, se fosse liberada subitamente, o mundo ganharia uma arma de alto potencial (BRENNAN, 2003).

Apesar de suas grandes descobertas, os trabalhos desenvolvidos por Einstein ganharam fama muito lentamente. Ele continuou trabalhando no departamento de patentes da Suíça até 1909 e, depois, assumiu o cargo professor titular na Universidade de Zurique, mas foi a partir de 1914, quando assumiu um cargo na Academia Prussiana, de Berlim, que Einstein retomou seus estudos sobre Física Teórica. Em 1916, ele publicou a obra intitulada *O fundamento da teoria geral da relatividade*, que se constitui em uma extensão de sua teoria especial, e a "convicção de Einstein em que as leis da natureza deveriam ser expressas na mesma forma em todos os sistemas de referência, tanto não acelerados como acelerados, foi a motivação primária que o levou à teoria geral da relatividade" (HEWITT, 2008, p. 623).

A Relatividade Geral de Einstein é uma teoria que relaciona o espaço e o tempo com o conteúdo de energia do Universo. A equação tensorial proposta por Einstein $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ relaciona informações sobre a geometria do espaço-tempo em $G_{\mu\nu}$ e informações sobre a energia em $T_{\mu\nu}$. Dessa maneira, o conteúdo de matéria (um planeta, por exemplo) afetará o espaço-tempo ao seu redor, que, por sua vez, definirá o caminho percorrido por uma partícula em queda livre ao seu redor.

Pesquise mais

Para Einstein, não existe algo como uma "Força Gravitacional" pois as partículas apenas são obrigadas a seguir seus caminhos naturais na geometria do espaço-tempo. Para visualizar isso, veja o vídeo a seguir, a partir de 2:47: <https://www.youtube.com/watch?v=l-BVkHRLPfo&t=1s>. Acesso em: 11 jul. 2018. Note que as bolinhas

lançadas no lençol têm um movimento parecido com partículas orbitando ao redor de um planeta ou caindo sob a atração de uma força gravitacional.

Importante frisar que, no limite para baixas velocidades e pequenas energias, a Relatividade Geral de Einstein e a gravitação newtoniana concordam. Mesmo para lançar foguetes dentro do sistema solar as correções relativísticas aos cálculos newtonianos são pequenas (mas precisam ser levadas em conta dada a precisão exigida para a exploração espacial).

A Relatividade Geral de Einstein vem sido testada há cem anos, sempre com sucesso. Um dos últimos testes ocorreu com o lançamento do satélite ***Gravity Probe B***, que confirmou as previsões de Einstein. Uma das primeiras confirmações da Relatividade Geral foi em uma missão para observar o desvio da luz de uma estrela pelo Sol durante um eclipse solar. Uma das missões veio para o Brasil buscando observar o eclipse na cidade de Sobral, mas, devido a condições climáticas, a outra missão teve mais sucesso na observação.

Nos concentrando nas ideias que compõem a base da teoria de Einstein, o que ele tentou fazer foi elaborar uma teoria da gravitação de maneira que esta estivesse em concordância com sua teoria especial. Assim, estabeleceu que quando algo está em queda livre, tudo em seu interior aparenta não ter peso, tal como acontece com os astronautas dentro de uma espaçonave em órbita (BRENNAN, 2003). Do mesmo modo, um observador em um elevador no interior de uma nave espacial acelerando a $9{,}8\ m/s^2$ causaria no astronauta a mesma sensação de estar de pé na superfície da Terra. Basicamente, o que Einstein demonstra em sua obra, a partir de uma matemática mais complexa que em comparação com a obra em que divulga seus pressupostos sobre a relatividade especial, é o princípio da equivalência como conceito base de suas ideias, a qual é enunciada como: "Um campo gravitacional homogêneo é completamente equivalente a um referencial uniformemente acelerado" (TYPLER; MOSCA, 2017, p. 171).

A luz deve se curvar em um campo gravitacional e, portanto, a gravidade não seria uma força como afirmava Isaac Newton (1643-1727), mas uma curvatura no próprio espaço-tempo, causada pela presença de massas muito grandes, como o Sol. Dessa forma,

devemos construir um espaço-tempo constituído de quatro dimensões: comprimento, largura, altura e tempo.

Logo Einstein notou que seus cálculos indicavam que o universo estaria em expansão, ainda que esse fato só veio a ser comprovado anos mais tarde por Edwin Powell Hubble (1889-1953) e outros físicos e astrônomos. Na época, Einstein acreditava que o Universo deveria ser estático, e por isso inseriu em sua equação uma constante. A expansão do Universo foi comprovada posteriormente, e Einstein admitiu que inserir a constante em suas equações teria sido "um erro". Entretanto, atualmente, verificou-se que o Universo se encontra em expansão acelerada, e o mecanismo mais aceito para explicar o fenômeno exige justamente que a constante cosmológica seja inserida em sua equação.

Em 1922, o matemático Alexander Friedmann (1888-1925), resolveu as equações cosmológicas de Einstein e percebeu que a expansão indicada conduzia à evidenciação de uma explosão no início do tempo. Suas resoluções foram redescobertas por Georges Lemaître (1894-1966) e George Gamow (1904-1968), que formularam a teoria de que o universo seria, a princípio, um corpo muito denso que, por alguma razão, explodiu e liberou energia que, posteriormente, formou partículas, estrelas e galáxias, o que Gamow denominou de teoria do "Big-Bang" (BRENNAN, 2003).

Além disso, a partir das equações cosmológicas de Einstein, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) formulou soluções para a concepção de *buracos negros*.

Apesar de seus grandiosos trabalhos sobre a relatividade, em 1922, Einstein recebeu o Prêmio Nobel não por essa teoria, mas por suas contribuições a respeito do efeito fotoelétrico.

Pesquise mais

Para que você possa visualizar e melhor compreender as ideias de espaço-tempo e de buracos negros, de acordo com concepções de Einstein, assista ao vídeo da National Geographic, *Além do cosmos: o espaço* (de 10:42 a 15:13).

Também saiba mais sobre a teoria de expansão do universo fazendo a leitura do artigo *A Expansão do Universo* (páginas 163-171), disponível em: <http://www.cepa.if.usp.br/e-fisica/apoio/textos/v22_163.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2018.

Sem medo de errar

Dando início à sua palestra, cuja abordagem histórica é relacionada ao desenvolvimento da teoria da Relatividade e suas aplicações, suponha que, enquanto você explicava sobre o desenvolvimento histórico da ideia sobre a dilatação do tempo, percebeu que alguns alunos não estavam compreendendo muito bem suas explicações.

Assim, você poderia conduzir os estudantes a um laboratório de informática da escola, e utilizar a *Internet*, para acesso de uma animação que se constitui de uma situação hipotética, para explicar a teoria de Einstein a respeito da dilatação do tempo (disponível em: <https://novaescola.org.br/conteudo/4759/o-trem-de-einstein>. Acesso em: 24 jun. 2018). A animação apresenta a cena de um trem viajando na velocidade da luz e, em seu interior, há um viajante que mira uma lanterna em direção a um espelho alocado no teto do vagão. Por meio da animação, os alunos poderiam verificar o que acontece com o tempo entre a emissão, a reflexão no espelho e o retorno da luz em duas situações: segundo um observador interno ao vagão e segundo um observador externo. Assim, você poderia conduzir os estudantes a concluírem que o tempo não é absoluto, mas depende da velocidade.

Você poderia aproveitar esse momento para dizer que os principais fenômenos relativísticos não foram provados experimentalmente por Einstein, mas que foi ele quem relatou algumas situações hipotéticas, oportunizando um "exercício mental" àqueles que tivessem contato com suas obras. Além disso, nesse momento, seria muito importante você enfatizar aos alunos que, nessa situação, devido a velocidade ser muito inferior à velocidade da luz, o que se evidenciaria na realidade seria algo mais condizente com a teoria newtoniana do que com a de Einstein. Entretanto, não levou muito tempo para que elas fossem provadas.

Outra estratégia metodológica que você poderia adotar seria narrar o paradoxo dos gêmeos, uma situação imaginária que foi criada para explicar os efeitos da dilatação do tempo.

Nessa situação hipotética, um dos gêmeos viajaria em uma nave espacial em alta velocidade, enquanto que o outro ficaria na Terra. Nessa viagem, o primeiro gêmeo irá até uma estrela localizada a muitos anos-luz de distância. Para o irmão que está viajando em uma

velocidade elevada, o espaço a ser percorrido até a estrela é menor se comparado ao espaço do irmão que ficou na Terra até a mesma. Supondo que os relógios dos dois irmãos tenham sido zerados pouco antes de o gêmeo viajante partir. Quando o irmão viajante retornar, estará mais novo que o irmão que ficou na Terra, pois o tempo do relógio do irmão que fez a viagem, passa mais devagar que o do relógio do irmão que ficou na Terra (BONJORNO et al., 2016).

Para complementar a história sobre o paradoxo dos gêmeos, você poderia incluir alguns vídeos a serem mostrados aos alunos. Um deles, é um documentário intitulado *Um ano no espaço – paradoxo dos gêmeos*, que relata como o corpo de astronauta mudou após um ano no espaço, comparado ao de seu irmão gêmeo na Terra. O vídeo está disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=GAIdco09giU>. Acesso em: 24 jun. 2018. Outro vídeo é o intitulado *Exemplos sobre a teoria da relatividade*, que apresenta algumas explicações que ilustram a teoria da relatividade, inclusive sobre a dilatação do tempo.

Ao propor as abordagens envolvendo a dilatação do tempo, como o caso do paradoxo dos gêmeos, você poderia instigar seus alunos a refletirem sobre possíveis aplicações das noções de relatividade para a sociedade atual. Um ótimo exemplo seria a aplicação desses conhecimentos nos cálculos do GPS (sistema de posicionamento global), equipamento capaz de indicar a posição exata em qualquer local da superfície terrestre. Você poderia conduzir os estudantes a pesquisarem o princípio básico de funcionamento do GPS, evidenciando que para o mesmo existe uma frota de satélites orbitando ao redor da Terra, os quais transportam relógios atômicos de precisão.

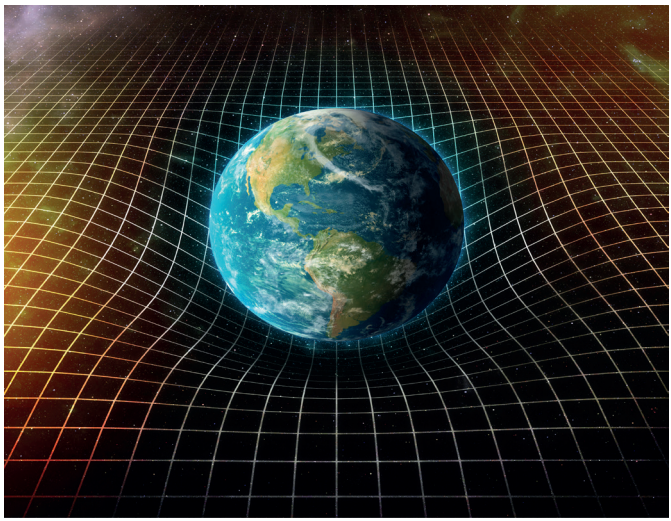
Avançando na prática

Simulando a curvatura espaço-tempo

Descrição da situação-problema

Imagine que você é um professor de Física do Ensino Médio, que está tentando explicar os pressupostos da Teoria da Relatividade Geral para seus alunos do 3º ano do Ensino Médio, apresentando a deformação (ou curvatura) do espaço-tempo provocada por uma massa, conforme ilustra a figura a seguir:

Figura 4.4 | Representação da curvatura espaço-tempo



Fonte: iStock.

Durante essas explicações, alguns alunos mencionaram que não conseguiam compreender como os planetas, por exemplo, seriam "atraídos" pelo Sol, descrevendo suas órbitas em torno dele. Para auxiliar seus alunos nessa compreensão dessa questão, que estratégia(s) metodológica(s) você poderia adotar, utilizando como base os aspectos históricos da Física?

Resolução da situação-problema

Primeiro, você poderia falar que para Einstein não existe força gravitacional, que o caminho dos planetas é o caminho mais natural no interior do espaço-tempo, assim como o caminho mais natural seria uma linha reta em um local onde não existem influências gravitacionais. Mas seria importante frisar que tanto a teoria de Einstein quanto a de Newton (e sua força gravitacional) concordam no limite de baixas velocidades e energias.

Em seguida, você poderia propor um experimento muito simples: pedir para os alunos esticarem um lençol acima do solo, de maneira a formar uma superfície plana. No centro do lençol, colocar um objeto esférico e denso, de maneira a deformar o plano. Essa deformação simularia a curvatura criada pela massa de um corpo no espaço-

tempo. Em seguida, os alunos poderiam colocar no lençol, próximo ao objeto esférico em seu centro, uma bolinha de gude, de maneira que ela passe próximo do objeto central. Em seguida, outros objetos esféricos de massas distintas poderiam ser acrescentados da mesma forma no lençol esticado. O que seria observado é que qualquer objeto colocado próximo à massa esférica central se moverá na direção dela, como se uma força atrativa existisse e fosse responsável pela mudança do estado inicial de movimento de cada corpo, simulando a ação da força gravitacional. Dessa forma, você poderia auxiliar seus alunos a compreenderem como o espaço-tempo se deforma na presença de um corpo e como depende da massa desse corpo. Você poderia, ainda, aproveitar o momento para trazer à tona aspectos históricos, destacando que a região deformada, que simula um campo gravitacional, é mais intensa nas proximidades do corpo esférico central, buscando estabelecer alguma associação entre tal observação e a teoria gravitacional de Newton e as ideias defendidas por Einstein.

Faça valer a pena

1. A Teoria Especial (ou Restrita) da Relatividade foi proposta por Albert Einstein em 1905, revolucionando ideias sobre o espaço e o tempo. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, estendendo ideias da primeira teoria para referenciais não inerciais. A respeito dessas teorias, julgue as afirmativas a seguir:

I. A Teoria Especial da Relatividade prediz a existência de situações nas quais dois eventos que acontecem em instantes diferentes, para um observador em um dado referencial inercial, podem acontecer no mesmo instante, para um outro observador, em outro referencial inercial.

II. A principal consequência da Teoria Geral da Relatividade é o estabelecimento de que o fenômeno de simultaneidade é absoluto, e não relativo.

III. A relatividade da simultaneidade é consequência do fato de que a velocidade de propagação da luz no vácuo é independente do sistema de referência inercial em relação ao qual ela é considerada.

Assinale a alternativa correta:

a) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
b) Apenas a afirmativa II é verdadeira.
c) Apenas a afirmativa III é verdadeira.
d) As afirmativas I e II são verdadeiras.
e) As afirmativas I e III são verdadeiras.

2. O período de descobertas realizadas na área da Física a partir do final do século XIX marcaram o período denominado de Física Moderna. Em relação a algumas das descobertas realizadas nesse período, julgue cada uma das afirmativas a seguir como verdadeira (V) ou falsa (F):

( ) A Física Moderna apontou limitações da Física Clássica.
( ) As teorias formuladas no período da Física Moderna são totalmente contraditórias às leis de Newton.
( ) Na Teoria Especial da Relatividade afirmou-se que as leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.
( ) Na Teoria Especial ou Restrita da Relatividade afirmou-se que a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor independentemente do movimento da fonte ou do sistema de referência do observador.
( ) Tanto a Mecânica Clássica como a Teoria da Relatividade afirmam que a massa de uma partícula não varia com a velocidade.

Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, as valorações corretas para cada afirmativa:

a) V, F, F, V, F.
b) V, V, F, V, V.
c) V, F, V, V, F.
d) F, V, V, F, F.
e) F, F, V, F, V.

3. A Teoria Especial da Relatividade foi proposta por Albert Einstein em 1905 e recebe esse nome por ser um caso especial da Teoria da Relatividade Geral, divulgada em 1916. Na Teoria Especial da Relatividade, Einstein formulou dois postulados, o primeiro sobre a equivalência de leis física e, o segundo, sobre a invariância da velocidade da luz. Considerando algumas das consequências importantes desses postulados, faça a associação correta:

1 – Simultaneidade.
2 – Dilatação temporal.
3 – Contração do espaço.
4 – Equivalência entre massa e energia.

( ) Einstein concluiu que dois eventos que são observados ao mesmo tempo e considerados simultâneos por um observador podem ser observadas em momentos distintos para outro quando existir movimento relativo entre eles, o que será evidenciado para velocidades próximas à da luz.

( ) O comprimento de um objeto movendo-se com relação ao observador se contrai no sentido do movimento, o que se torna pronunciado quando a velocidade se aproxima à da luz.
( ) Einstein propôs a ideia de que o produto entre a massa de um corpo pelo quadrado da velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo corresponderia à energia total relativística desse mesmo corpo.
( ) Com relação a um observador parado, o relógio de um observador em movimento passa mais vagarosamente, o que se torna observável para velocidades próximas à da luz.

Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, a relação correta:

a) 1, 3, 4 e 2.
b) 1, 2, 4 e 3.
c) 2, 4, 3 e 1.
d) 2, 1, 3 e 4.
e) 3, 2, 4 e 1.

Seção 4.2

Mecânica Quântica

Diálogo aberto

Desde os computadores até os equipamentos médicos que permitem a geração de imagens minuciosas do corpo humano, verificamos contribuições da Física Quântica. Estudos sobre o efeito fotoelétrico permitiram, por exemplo, a elaboração de sensores que permitem a abertura e o fechamento automático de portas, o acender e o apagar automático de postes de iluminação e o funcionamento de sistemas fotovoltaicos. Além disso, esse e outros estudos que contemplam a compreensão e a explicação do mundo microscópico permitiram desenvolvimentos médicos incríveis, permitindo diversos tipos de avaliações, até mesmo, o diagnóstico de vários tipos de câncer.

Mas, além do efeito fotoelétrico, quais são os demais estudos realizados na denominada Física Quântica? Como esses estudos se desenvolveram? E qual foi a motivação inicial para esses estudos?

Para descobrir tudo isso e, ainda, conhecer formas de transpor tais conhecimentos em sua futura prática docente, nesta seção, você continuará no papel de um diretor e professor de Física que está ministrando palestras sobre a História da Física Moderna e Contemporânea a alunos do 3º ano. Chegou o momento em que você abordará os pressupostos históricos da Mecânica Quântica e seu desenvolvimento. Durante sua palestra, visando torná-la mais dinâmica e integrar os alunos nas discussões, você solicitou que eles escolhessem um dos temas abordados e utilizassem a Internet de seus celulares para investigar algumas aplicações desse. O tema mais votado pelos alunos foi o efeito fotoelétrico, talvez a palestra anterior sobre Einstein tenha sido um fator para a seleção. Você percebeu que seus alunos ficaram entusiasmados com a variedade de aplicações desse efeito e ficaram interessados em conhecê-lo melhor.

Que estratégia didática você poderia adotar para esclarecer aos alunos o efeito fotoelétrico sem perder de vista a temática da palestra, ou seja, sem deixar de incluir nessa estratégia o desenvolvimento

histórico da Mecânica Quântica? A respeito do efeito fotoelétrico, que aplicações os alunos poderiam ter encontrado na Internet de maneira a despertar suas atenções e curiosidades?

Antes de discutir essa temática, durante a palestra, você terá muitas passagens históricas sobre o desenvolvimento da Mecânica Quântica para apresentar aos alunos. Por isso, nesta seção, você conhecerá quais são as abordagens que não podem faltar em sua palestra, tais como: os primórdios da Mecânica Quântica, evidenciando os problemas que a Física Clássica não foi capaz de explicar e que foram solucionados pela quantização de energia; os nomes que se destacaram no desenvolvimento da Mecânica Quântica e quais suas principais contribuições; e a estreita relação entre Física e Química no desenvolvimento da Mecânica Quântica.

Você está preparado para viajar no tempo e conhecer a fascinante história do desenvolvimento da Mecânica Quântica? Bons estudos!

Não pode faltar

Não podemos negar a extraordinária utilidade da Física Clássica para descrever e explicar diversos fenômenos, porém existem alguns que ela não consegue explicar. Entre o final do século XIX e início do século XX, mesmo que o conhecimento da física tenha avançado e suas teorias tenham se consolidado, ainda existiam perguntas sem respostas e foi a busca por estas que deu início ao desenvolvimento da Física Quântica.

Reflita

O fato da Mecânica Clássica não descrever os fenômenos indicados a seguir significa que ela está errada? O que são os limites de validade de uma teoria científica, e como as novas teorias se relacionam com as anteriores?

Dentre os problemas que a Física Clássica não era capaz de explicar satisfatoriamente, encontramos a radiação do corpo negro, que desencadeou o processo de desenvolvimento da Física Quântica. Você já sabe e, na verdade, há muito tempo a humanidade sabe que um objeto quando suficientemente aquecido irradia luz como, por exemplo, uma barra de ferro colocada na brasa que

adquire uma cor incandescente avermelhada a uma determinada temperatura. A coloração que será adquirida pelo corpo depende da temperatura, podendo variar do vermelho fosco até o branco ou azul. A luz irradiada pelo corpo aquecido corresponde a uma porção de energia transportada por ondas eletromagnéticas de diversas frequências.

A Física Clássica já explica que a alteração da coloração do material aquecido está relacionada à agitação térmica das partículas que compõem o corpo, de modo que, com o aumento da temperatura, as partículas adquirem maior energia e, portanto, se agitam mais e irradiam mais energia. Contudo, os cálculos baseados na teoria clássica não permitiam a compreensão de tal fenômeno, uma vez que, dessa forma, "previa-se a emissão de uma quantidade infinita de energia nas frequências mais altas, o que, evidentemente, não podia corresponder à realidade" (DIONÍSIO, 2004, p. 4).

Em meados do século XIX, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) realizou experimentos a respeito da absorção e emissão de energia radiante, descobrindo que com a incidência de ondas eletromagnéticas sobre um corpo, este absorve certa quantidade de energia e, para uma mesma temperatura, este corpo emitiria a mesma quantidade de energia. Com seus experimentos surge a denominação corpo negro ou *radiador ideal*.

Assimile

Um *corpo negro* é um corpo capaz de absorver toda e qualquer radiação incidente sobre ele e na parede interna desse corpo, ocorrerá sequencialmente à absorção, a emissão total da energia associada à radiação absorvida e, por isso, esse corpo também é denominado de *radiador ideal*.

Kirchhoff descobriu, portanto, que a energia emitida pelo corpo negro dependia apenas de sua temperatura e do comprimento de onda (CHERMAN, 2005). Contudo, ele não foi capaz de equacionar a dependência da energia com essas duas grandezas.

Um corpo negro irradia um conjunto de comprimentos de onda (um espectro), e Wilhelm Wien (1864-1928) elaborou uma equação para explicar a distribuição de radiação do corpo negro, relacionando a temperatura (T) com o comprimento de onda mais emitido

($\lambda_{máx}$), afirmando que ambas as grandezas seriam inversamente proporcionais e que o produto entre elas seria constante, o que em termos matemáticos seria representado por:

$$\lambda_{máx} \cdot T = 2{,}897 \cdot 10^{-3}\,\text{m} \cdot \text{K}$$

O resultado do produto é denominado constante de dispersão de Wien, cuja unidade é metro-Kelvin (m K).

A teoria de Wien explicava bem o que é observado empiricamente, que difere da previsão da Física Clássica. Há concordância na região de grandes comprimentos de onda (pequenas frequências), mas para comprimentos de onda maiores previa-se teoricamente que a densidade de energia da radiação tenderia ao infinito, enquanto que, experimentalmente, observava-se que a densidade tendia a zero. Essa diferença era notável, sobretudo, na região do ultravioleta, por isso tal fenômeno ficou conhecido como catástrofe do ultravioleta.

A coincidência entre a curva teórica e a experimental só foi solucionada em 1900, pelo físico alemão Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), que pertenceu a uma família de professores acadêmicos, Planck sempre foi um aluno exemplar, que obteve o grau de doutor com apenas 21 anos de idade. Ele propôs que a absorção de energia térmica e emissão de energia luminosa de um corpo acontece de maneira descontínua (BRENNAN, 2003). O raciocino de Planck, de certa forma, rompia com concepções clássicas da teoria do Eletromagnetismo de Maxwell a respeito de que a absorção, a emissão e a propagação de ondas eletromagnéticas seriam processos contínuos. Para Planck, a energia existiria em pequenas unidades fundamentais, que denominou de *quantum*, afirmando que o corpo só poderia absorver ou emitir energia E em quantidades bem determinadas e discretas e, portanto, em múltiplos de *quantum*, em que h é denominada constante de Planck e f a frequência de radiação:

$$E = h \cdot f$$

Com base nessa reflexão e nos trabalhos de Boltzmann e Wien, foi possível construir uma solução correta para a radiância espectral do corpo negro. O trabalho de Planck de 1900 é considerado como o ponto inicial da Física Quântica. A solução dada por Planck para o problema do corpo negro é considerada como ponto inicial da Física Quântica e, consequentemente, marca a transição entre a

Física Clássica e a Física Moderna. Vale ressaltar que nesse mesmo período outras teorias físicas estavam sendo desenvolvidas, como a Teoria da Relatividade Especial, de Albert Einstein (1879-1955), e as descobertas relativas ao átomo, de Niels Bohr (1885-1962), entre outras que, de certa forma, foram influenciadas pelas descobertas de Planck.

Apesar da Teoria da Relatividade Especial ter sido elaborada logo após a descoberta de Planck, os trabalhos deste influenciaram, sobretudo, outra descoberta de Einstein, a qual explicou outro fenômeno observável que intrigava aos físicos da época, o *efeito fotoelétrico*.

Em 1887, Hertz fez experimentos sobre o efeito fotoelétrico, induzindo os metais irradiados a emitirem faíscas elétricas. Com o avanço das pesquisas com tubos de raios catódicos em 1896, Thomson e colaboradores foram capazes de identificar os raios catódicos como compostos de partículas individuais, os elétrons. Nas pesquisas da época, já havia sido descoberto que a intensidade da luz (dependente do número de fótons de luz) não influenciava no aumento ou diminuição dessa emissão de elétrons, apenas a frequência da luz provocava variação na emissão.

Foi Einstein quem conseguiu, em 1902, fornecer uma explicação compatível com os fatos experimentais. Tal explicação foi publicada em 1905, e foi devido a essa descoberta que, em 1921, ele recebeu o prêmio Nobel de Física.

Fundamentado na ideia de *quantum*, de Planck, Einstein propôs que a luz seria composta por pequenos "pacotes" de energia, denominadas de *fótons*, proporcionais a sua frequência, de modo que cada fóton transportaria um *quantum* de energia. Dessa forma, assumindo a radiação na forma de pacotes de energia, e que essa energia é utilizada na emissão de elétrons, então "a radiação de alta frequência deveria arremessar elétrons com mais energia que a radiação de baixa frequência" (BRENANN, 2003, p. 114). Além disso, Einstein postulou que a velocidade de emissão do elétron seria direta proporcionou a energia do *quantum*. Em outras palavras, Einstein postulou que um único fóton carrega uma energia *hf* para o emissor, de modo que ela é essencialmente transferida para um único elétron. Uma parte dessa energia, denominada de *função de trabalho* ϕ do material da superfície emissora, é empregada

na produção da saída do elétron do emissor (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2010). Em termos matemáticos, temos:

$$hf = \phi + K_{máx}$$

Em que $K_{máx}$ corresponde à energia cinética máxima que o elétron pode ter após sair da superfície do emissor. A questão é que cada elétron só pode absorver um fóton por vez. Se o fóton não possui energia suficiente para arrancar o elétron, um número maior de fótons incidindo sobre o metal (irradiar luz com alta intensidade, mas baixa frequência) também não será suficiente para retirar o elétron. Cada fóton deve ter uma frequência mínima tal que $hf_{min} = \phi$.

Reflita

A explicação de Einstein serviu para retomar uma velha polêmica: a natureza corpuscular ou ondulatória da luz. Reflita sobre em que sentido podemos entender que essa polêmica foi retomada e que episódios da história da Física Moderna evidenciam essa retomada.

A teoria de Einstein foi confirmada experimentalmente em 1916, pelo físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953).

A teoria quântica também influenciou os trabalhos sobre estrutura atômica que estavam sendo desenvolvidos por Niels Bohr (1885-1962). Ao incorporar essa teoria aos seus estudos, foi capaz de revolucionar teorias atômicas. Dentre suas publicações, destaca-se uma que foi publicada em 1913, na qual Bohr expôs sua teoria quântica para o átomo de hidrogênio, o que lhe conferiu, em 1922, o prêmio Nobel (BRENNAN, 2003).

Entre a Química e a Física existia, naquele período, uma forte relação. Considerando o modelo de átomo proposto por Ernest Rutherford (1871-1937), por exemplo, Bohr deu início ao desenvolvimento de seu modelo, buscando responder o que manteria os elétrons em seus lugares no átomo nuclear. Segundo o Eletromagnetismo, partículas se movimentando em órbitas circulares deveriam emitir radiação, perdendo energia. Assim, na teoria clássica, os átomos concebidos como elétrons girando ao redor de um núcleo não poderiam ser estáveis, pois acabariam

caindo sobre o núcleo. Ao fixar a absorção ou emissão de energia pelos elétrons em pacotes discretos, os elétrons foram fixados em suas órbitas.

Em 1913, ele concebeu o modelo de átomo de hidrogênio, de modo a estabelecer que o elétron localizado em uma órbita específica não ganhava e nem perdia energia, mas quando mudava de órbita, absorveria ou emitiria energia. Os elétrons mais afastados do núcleo teriam maior energia e poderiam saltar para níveis mais elevados ao absorver energia e, de maneira contraria, irradiaria energia ao saltar para níveis mais próximos do núcleo do átomo. Esses "saltos" aconteceriam de maneira discreta e, para explicar isso, Bohr se fundamentou na teoria de Planck, considerando que um átomo só poderia absorver ou emitir *quantum*, mais especificamente, fótons (BRENNAN, 2003).

Pesquise mais

Saiba mais sobre a teoria atômica de Bohr lendo o editorial *O legado de Niels Bohr,* disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/qn/v36n7/01.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2018.

Você também pode saber mais sobre essa teoria lendo as páginas 151-156 do livro *Gigantes da Física: uma história da Física Moderna através de oito biografias*, disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788537805992/cfi/6/26!/4/32@0:87.3> Acesso em: 1 jul. 2018.

Foi Bohr quem colocou um ponto final nas discussões sobre a natureza ondulatória ou corpuscular da luz, estabelecendo o princípio da complementaridade, conhecido como dualidade onda-partícula, em 1929. Por meio desse princípio, Bohr estabeleceu que seria necessário considerar as duas teorias de maneira a se complementarem, de modo que para determinar o comportamento da luz em alguns fenômenos precisamos considerar seu caráter ondulatório, e em outros seu caráter corpuscular.

Pensando na dualidade onda-partícula apresentada pela luz, Louis de Broglie (1892-1987), em 1924, enunciou que, se a luz, entendida como onda, poderia apresentar também comportamento corpuscular, então o elétron, entendido como uma partícula,

poderia apresentar também comportamento ondulatório, atribuindo à matéria uma frequência (f) ou um comprimento de onda (λ), considerando a quantidade de movimento da matéria ($p = m \cdot v$):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

Assim, a expressão matemática denota característica corpuscular (p) e característica ondulatória (f e λ) para qualquer partícula com massa, além do elétron. Graças a esse princípio foi possível inventar o microscópio eletrônico, por exemplo.

Assimile

A partir dos resultados de Planck:

- Einstein postulou que os elétrons do metal somente seriam capazes de absorver pacotes discretos de energia transmitidos por um único fóton, explicando porque somente a frequência da luz era relevante no efeito fotoelétrico, mas não a intensidade da luz.

- Bohr enunciou o princípio da complementariedade, afirmando que a luz poderia ser considerada como uma onda eletromagnética ou como um feixe de partículas, além de construir um modelo quântico para o átomo de hidrogênio, considerando que os elétrons somente poderiam orbitar ao redor do núcleo em níveis de energia específicos.

- De Broglie estabeleceu que se a luz ou a energia poderiam ter natureza dual de onda-partícula, então, da mesma forma, a matéria também poderia ser onda ou partícula, uma vez que ela poderia se transformar em energia (CHERMAN, 2005).

Por mais que a Física Quântica tenha se mostrado revolucionária até esse ponto, ela ainda estava prestes a passar por mais uma revolução. Agora, apresentaremos alguns dos principais nomes desse período que buscaram elaborar linguagens matemáticas mais elaboradas para expressar as novas teorias físicas.

O físico alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976) trabalhou como assistente de Bohr, em Copenhague, buscavam determinar

uma teoria matemática para o átomo. Mas, ainda antes dessa parceria, Heisenberg já havia desenvolvido resultados com base em álgebra não-comutativa (em que, por exemplo, $A \cdot B \neq B \cdot A$, como no caso das matrizes) e, para trabalhar os problemas quânticos, elaborou uma álgebra matricial na qual cada um dos possíveis estados quânticos de um sistema é representado como um elemento de matriz, e o resultado da operação entre diferentes matrizes descreve as possíveis interações quânticas. Tais operações permitem localizar a probabilidade do observador encontrar o sistema em um ou outro estado quântico ao realizar um experimento.

De maneira independente, o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), fundamentado nas descobertas de De Broglie, dedicou-se a aperfeiçoar o átomo de Bohr, estabelecendo uma mecânica ondulatória pautada na função de onda das partículas, e não nas partículas em si.

Houveram discussões entre Schrödinger de um lado, e Bohr e Heisenberg de outro, sobre qual seria a descrição correta para os fenômenos quânticos. Entretanto, pouco tempo mais tarde, o físico britânico Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) demonstrou que os métodos de Heisenberg e Schrödinger eram equivalentes para explicar os mesmos problemas da Mecânica Quântica.

Em 1927, Heisenberg publicou o artigo, *Sobre o conteúdo perceptivo da cinemática e da mecânica quântica teórica*, no qual ele apresentou a formulação do *Princípio da Incerteza*, que enuncia: "[n]ão é possível medir, simultaneamente, a posição e a quantidade de movimento de uma partícula com precisão ilimitada" (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2010, p. 173). Tal princípio teve origem em tentativas teóricas de determinação da órbita exata dos elétrons em um átomo (BRENNAN, 2003), e diz respeito à impossibilidade de determinação minimizada indefinidamente, ou seja, o simples ato de mensurar algo provoca uma mudança irreversível no sistema, que não deixa vestígios sobre seu estado posterior à mensuração. Por exemplo, não seria possível medir ao mesmo tempo a posição e a quantidade de movimento de uma partícula, pois, quanto mais se souber sobre uma grandeza, menos se saberá sobre a outra. Em resumo, a medição sempre envolverá certo grau de incerteza e, de maneira mais geral, o princípio de Heisenberg confirmou que o conhecimento que possuímos do mundo natural não é, e nunca foi, totalmente preciso (BRENNAN, 2003).

Podemos descrever o princípio como $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi$. Ou seja, o produto da indefinição na posição e no momento nunca poderá ser menor ou igual do que a constante de Planck dividida por 2π. Se temos muita certeza sobre a posição de uma partícula ($\Delta x \to 0$), para compensar a indefinição no momento (na velocidade) explodirá ($\Delta p \to \infty$) para satisfazer a expressão, e o caso contrário também pode ocorrer, se temos muita certeza sobre a velocidade.

As descobertas de Heisenberg para a Mecânica Quântica conferiram a ele o Prêmio Nobel de Física, em 1933.

Nessa mesma época, Bohr havia interpretado a equação de Schrödinger, a qual é considerada como a equação fundamental da Mecânica Quântica, e que conferiu a Schrödinger o prêmio Nobel em Física, em 1933:

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\cdot\frac{d^2\psi(x)}{dx^2}+U(x)\psi(x)=E\psi(x)$$

A equação mostrada a seguir é o caso mais simples para uma partícula confinada a se mover em uma dimensão, em que $\psi(x)$ é a parcela dependente do espaço da função de onda, *x* corresponde à coordenada de posição, *E* a energia total e *U(x)* a energia potencial. A equação de Schrödinger é o princípio fundamental da mecânica quântica, assim como as leis do movimento de Newton são fundamentais para a Mecânica Newtoniana e as equações de Maxwell são os fundamentos do Eletromagnetismo (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2010), cada função de onda permite obter a probabilidade de encontrar um elétron em uma determinada região do espaço, pois a probabilidade é dada por $|\psi|^2$. Assim, podemos obter a distribuição de probabilidades dependendo da posição, para encontrar a partícula em cada posição, dada por $|\psi(x)|^2$.

Além de Heisenberg e Schrödinger, em 1933, Dirac também recebeu o Prêmio Nobel de Física. Além de ter demonstrado a equivalência entre as abordagens de Heisenberg e Schrödinger, ele aplicou a função de onda da equação de Schrödinger ao campo eletromagnético, procedimento que ficou conhecido como *segunda quantização*, e que o conduziu à inauguração da Eletrodinâmica Quântica, em 1927 (CHERMAN, 2005). Além disso, foi ele quem previu teoricamente a existência da antimatéria, em 1930, em que afirmou que para cada partícula deveria haver uma *antipartícula*, com carga elétrica oposta, porém, de mesma massa (BRENANN, 2003).

Em 1928, Dirac postulou pela primeira vez a existência do pósitron, uma antipartícula do elétron. A primeira observação do pósitron foi realizada em 1932, por Carl David Anderson (1905-1991), o qual recebeu o prêmio Nobel em 1936 devido a essa descoberta.

E até onde a Mecânica Quântica poderia ser aplicada? Para mostrar que a teoria quântica não é intuitiva, em 1935, Schrödinger propôs um experimento mental, que consistia em um gato preso dentro de uma caixa fechada, com um contador Geiger, um material radioativo e uma ampola de veneno. Nesse aparato, a desintegração radioativa acionaria o contador, liberando o veneno que mataria o gato. Contudo, não seria possível prever se o gato estaria vivo ou morto sem necessariamente abrir a caixa.

Exemplificando

Suponha que um aluno tenha lido um artigo de divulgação científica que conta o experimento mental sobre o gato de Schrödinger. Você poderia aproveitar esse momento para esclarecer que Schrödinger propôs este experimento mental justamente para evidenciar o fato de que a Mecânica Quântica não é intuitiva, pois não respeita os conceitos e noções macroscópicos e da Física Clássica. Um sistema quântico pode realmente estar em dois estados ao mesmo tempo, e só poderemos definitivamente escolher um realizando uma medição. O observador influencia na medida, pois, para observar alguma coisa, ele força essa função de onda a colapsar, mostrando um único estado. Então, como já explicamos no princípio da incerteza, obter um único resultado implica alterar o estado do que é observado (irradiar um fóton sobre uma partícula, confinar a partícula em uma determinada posição com um laser etc).

De acordo com a interpretação da comunidade científica da época, mais especificamente em Copenhague, o gato estaria vivo e morto, simultaneamente, pois a função de onda contemplava as duas possibilidades. E, de fato, considerando o mundo microscópico, um elétron que não é observado é considerado numa superposição de estados quânticos, assim como no paradoxo do gato: se não for observado o interior da caixa, também haverá uma superposição de o gato estar vivo e morto.

Com o desenvolvimento da mecânica quântica, estabeleceu-se o conceito de números quânticos, que são as propriedades intrínsecas de cada partícula ou sistema. A natureza permite a criação de partículas com características semelhantes, como a massa, mas alguns números quânticos invertidos, por exemplo, uma carga elétrica oposta.

Uma interessante característica das antipartículas é que elas se aniquilam quando se encontram, outra é que elas podem ser formadas em pares a partir do vácuo.

Um dos mais importantes problemas em aberto da Física é descobrir porque nosso universo é composto majoritariamente por partículas de matéria, se todos os mecanismos conhecidos para formação de partículas produzem partículas e antipartículas em iguais quantidades.

Sem medo de errar

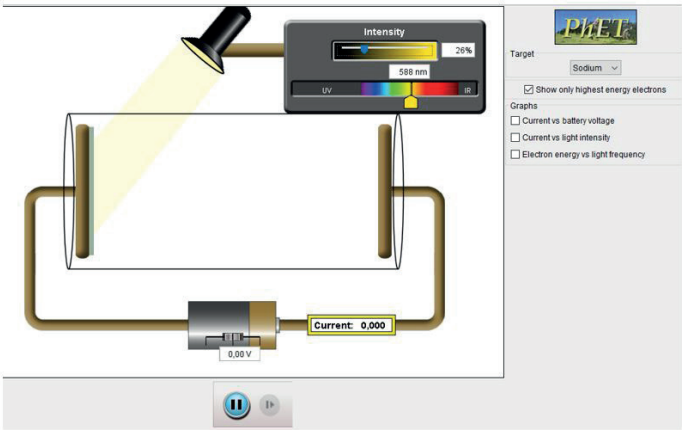
Durante a palestra sobre Mecânica Quântica, você orientou seus alunos a utilizarem a *Internet* de seus celulares para investigar algumas aplicações de um dos temas abordados na palestra, à escolha dos alunos. O tema mais votado por eles foi o Efeito Fotoelétrico.

Dentre as possíveis aplicações do Efeito Fotoelétrico, os alunos poderiam encontrar aplicações em células fotovoltaicas, que podem ser utilizadas para contagem do número de pessoas que passam por um determinado local, na abertura e fechamento automático de portas (como as de *shoppings*), em sistemas de alarmes, nos dispositivos que fazem com que a iluminação ligue e desligue automaticamente, entre muitas outras.

Percebendo o entusiasmo dos alunos com a variedade de aplicações desse efeito e verificando o interesse deles em conhecê-lo melhor, você poderia propor uma estratégia didática para auxiliar os alunos a compreenderem esse fenômeno, porém, sem deixar de lado a proposta da palestra, que é apresentar aspectos históricos do desenvolvimento da Mecânica Quântica. Assim, você poderia levar seus alunos ao laboratório de informática para que pudessem investigar o simulador interativo, disponibilizado pela Universidade do Colorado Boulder em: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>. Acesso em: 3 jul. 2018.

O simulador permitiria aos alunos constatar e investigar o Efeito Fotoelétrico:

Figura 4.7 | Simulador do Efeito Fotoelétrico

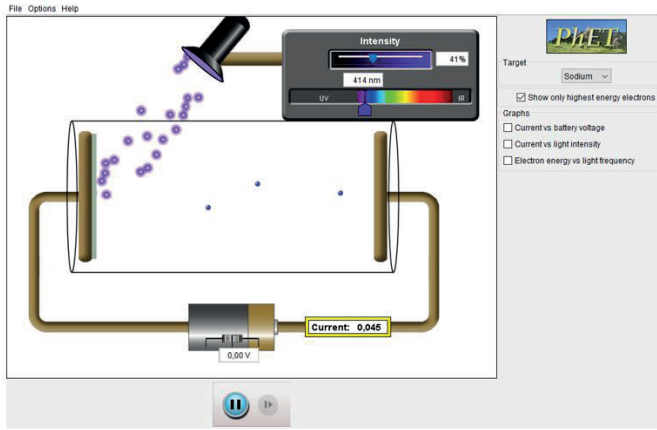


Fonte: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>. Acesso em: 3 jul. 2018.

De acordo com a Figura 4.7, o simulador é composto por uma fonte de radiação eletromagnética (cuja fonte é a figura de uma lanterna) que incide numa placa metálica (no cátodo), numa ampola no vácuo, cujo material fotossensível apresentado na figura é o sódio (porém, o simulador permite testar outros materiais). Essa radiação pode ser considerada em diferentes comprimentos de onda, desde a região do infravermelho até a região do ultravioleta. Também é possível controlar a intensidade da radiação eletromagnética.

O objetivo com o simulador é investigar se haverá ou não ejeção de elétrons para determinados comprimentos de onda e intensidade de radiação eletromagnética, considerando determinados materiais fotossensíveis. Isso tudo ainda pode ser controlado por um amperímetro disponível no circuito que mensura a corrente elétrica que o atravessa. Por exemplo, para as condições apresentadas na Figura 4.7, na região do infravermelho não há ejeção de elétrons. Mas, se aumentarmos a frequência, diminuindo o comprimento de onda, ou seja, ao se aproximar da região do ultravioleta, a energia dos fótons aumentará, e o efeito fotoelétrico será indicado pelo valor diferente de zero de passagem de corrente (Figura 4.8). No item "opções", é possível selecionar a visualização dos fótons emitidos, ou controlar o número de emissão de fótons:

Figura 4.8 | Indicação de Efeito Fotoelétrico no simulador



Fonte: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>. Acesso em: 3 jul. 2018.

Consultando o vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=vNL5UiVSpdo>, acesso em: 3 jul. 2018, você poderá compreender melhor como utilizar esse simulador, estabelecendo relações, inclusive, com o sistema de abertura e fechamento de portas automáticas. Hoje existem sensores de movimento por pressão, instalados no piso. Estamos falando aqui de sensores de movimento e ópticos. Não existe uma única maneira de construir um sensor como esses, mas, em geral, existe um emissor de radiação e um receptor, que funciona via efeito fotoelétrico. Ao receber luz, ele produz uma pequena corrente elétrica, como mostrado no simulador. Quando existe movimento, altera-se a corrente elétrica e isso é o gatilho para a abertura da porta.

Durante a utilização do simulador, você poderia promover discussões a respeito de aspectos históricos, conforme já discutidos durante a palestra e, até mesmo, acrescentar maiores informações. Por exemplo, você poderia mencionar que um dos primeiros físicos a constatar o Efeito Fotoelétrico foi Hertz, e que von Leonard contribuiu com a descoberta das leis que regem esse efeito, ainda que não as tenha explicado. Isso porque não era possível explicar esse fenômeno pelas Teoria do Eletromagnetismo de Maxwell. O fenômeno só explicado em 1905, por Einstein, ao estender a Teoria de Planck às radiações eletromagnéticas, considerando que a energia dessas radiações seria quantizada, postulando, dessa forma, que a radiação eletromagnética

seria considerada, nesse experimento, como um feixe de partículas, denominados fótons. Dessa forma, você teria uma ótima oportunidade para resgatar discussões sobre a natureza ondulatória e corpuscular da luz, desde os tempos mais antigos, até os postulados de que a luz e, até mesmo a matéria (conforme afirmou De Broglie), apresenta comportamento duplo onda-partícula, destacando, inclusive, o caráter interdisciplinar entre a Química e a Física.

Avançando na prática

Comprimento de onda de De Broglie para um elétron e para uma pessoa

Descrição da situação-problema

Durante uma aula sobre Mecânica Quântica para uma turma do terceiro ano do Ensino Médio, você, professor de Física dessa turma, ao abordar a dualidade onda-partícula utilizou a História da Física como estratégia metodológica. Dessa forma, apresentou vídeos, textos e provocou discussões sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico, em que fica evidente a luz como partícula, e sobre os postulados de Bohr sobre a luz poder se comportar como onda ou como partícula. Ao abordar sobre a proposta de De Broglie de que a dualidade também poderia ser válida para a matéria, um aluno mencionou: "É evidente que De Broglie estava errado, pois como é possível uma pessoa se comportar como uma onda?".

Como você poderia auxiliar o aluno a compreender a validade do postulado de De Broglie, considerando o questionamento que ele fez?

Resolução da situação-problema

Aproveitando a abordagem histórica, poderia ser mencionado que o postulado de De Broglie foi apresentado pela primeira vez como parte de sua tese de doutoramento, e suas demonstrações eram basicamente intuitivas. Até mesmo os membros de sua banca se sentiram receosos em aprova-lo, porém, o parecer positivo de Einstein, o qual recebeu uma cópia de um dos membros da banca para dar sua opinião, rapidamente De Broglie recebeu o título de doutor.

Mas, para os alunos compreenderem melhor a teoria, você poderia propor a eles a realização de cálculos para determinar o comprimento de onda de De Broglie para um elétron e para uma pessoa. Para o elétron, pode-se considerar uma velocidade de $3{,}0 \cdot 10^{6} m/s$, que é baixa o bastante para considerar a massa relativística do elétron como aproximadamente igual à sua massa em repouso, $m = m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31} kg$. Considerando a constante de Planck $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$, temos:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{(9{,}1 \cdot 10^{-31}) \cdot (3{,}0 \cdot 10^{6})} = 2{,}4 \cdot 10^{-10} m$$

Aqui você também poderia realizar a comparação com o raio de Bohr para o átomo de hidrogênio, mostrando que é uma grandeza relevante para mundo quântico.

Agora, você poderia considerar a massa do aluno. Supondo que seja igual a 60 kg e que ele esteja correndo a 10 m/s, temos:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{60 \cdot 10} = 1{,}1 \cdot 10^{-36} m$$

Esse resultado, se comparado com a resolução de um microscópio óptico, corresponde a um valor irrelevante. Assim, a partir dos resultados obtidos, conduza os alunos a refletirem sobre a ordem de grandeza obtida para cada caso, de maneira a auxiliá-los a compreender que corpos macroscópicos também apresentam comportamento ondulatório, porém, o comprimento de onda é de uma ordem tão pequena que faz com que tal comportamento não seja possível de ser mensurado, nem tão pouco seja observável.

Faça valer a pena

1. A respeito do início de desenvolvimento da Mecânica Quântica, analise as afirmativas a seguir:

I. A Mecânica Quântica nasceu a partir das descobertas de Max Planck associadas à *catástrofe do ultravioleta*, em que ele forneceu uma explicação satisfatória e determinou a famosa constante que leva seu nome.

II. A energia da radiação eletromagnética é quantizada, ou seja, a luz é quantizada em pequenos pacotes de energia proporcionais à sua frequência, e que também é absorvida pelos elétrons em pacotes discretos.

III. De acordo com a teoria quântica, a luz é emitida e absorvida em

pequenos pacotes chamados fótons, em que a quantidade de energia é proporcional ao comprimento de onda da luz.
Assinale a alternativa que apresenta apenas afirmativa(s) correta(s):

a) I e III, apenas.
b) II e III, apenas.
c) III, apenas.
d) I e II, apenas.
e) I, II e III.

2. Considerando alguns dos grandes nomes que marcaram o início de desenvolvimento da Mecânica Quântica, faça a relação correta:
1. Max Planck.
2. Albert Einstein.
3. Niels Bohr.
4. Louis de Broglie.

( ) Propôs a solução para o problema da radiação de um corpo negro, postulando que a matéria só pode absorver ou emitir energia em quantidades discretas.
( ) Estabeleceu que as radiações eletromagnéticas apresentam comportamento duplo, e que não é necessário considerar ambos os comportamentos para explicar um mesmo fenômeno.
( ) Estendeu o caráter dual da radiação eletromagnética a à partículas materiais, evidenciando o caráter corpuscular e ondulatório para a matéria.
( ) Assumindo a hipótese de quantização, ele sugeriu que os elétrons em uma placa metálica só podem absorver pacotes individuais de luz.

Assinale a alternativa que apresenta a relação correta, respectivamente:

a) 1, 3, 4, 2.
b) 3, 4, 2, 1.
c) 1, 4, 3, 2.
d) 3, 1, 2, 4.
e) 2, 3, 4, 1.

3. Desconstruindo mais alguns paradigmas da Física Clássica e contribuindo com as teorias sobre a natureza quântica dos elétrons, destacam-se na história da Física Moderna a elaboração dos postulados de Heisenberg e de Schrödinger: o Princípio da Incerteza e a Equação de Onda.

A esse respeito, considere as afirmativas:
(I). Quanto maior a certeza e precisão da posição de um elétron, menor será a certeza a respeito de sua velocidade.
(II). Cada função de onda representa a probabilidade de encontrar um elétron em uma determinada região do espaço, uma vez que um elétron não observado estará em superposição de estados quânticos.

Assinale a alternativa correta:

a) A afirmativa (I) refere-se ao Princípio da Incerteza e a afirmativa (II) refere-se à Equação de Onda, e ambas as afirmativas estão corretas.
b) A afirmativa (I) refere-se ao Princípio da Incerteza e a afirmativa (II) refere-se à Equação de Onda, e ambas as afirmativas não estão corretas.
c) A afirmativa (I) refere-se à Equação de Onda e a afirmativa (II) refere-se ao Princípio da Incerteza, e ambas as afirmativas estão corretas.
d) A afirmativa (I) refere-se à Equação de Onda e a afirmativa (II) refere-se ao Princípio da Incerteza, e ambas as afirmativas não estão corretas.
e) A afirmativa (I) refere-se ao Princípio da Incerteza e a afirmativa (II) refere-se à Equação de Onda, mas apenas a afirmativa (I) está correta.

Seção 4.3

Avanços recentes

Diálogo aberto

Atualmente temos cada vez mais acesso a tecnologias diversas. São computadores mais velozes e mais potentes, equipamentos eletrônicos diversos cada vez mais eficientes, dentre muitos outros artefatos elétricos e eletrônicos que tendem a melhorar a qualidade de vida. Como exemplo, podemos citar o uso da radioatividade na medicina, os computadores atuais e a construção de semicondutores e discos rígidos, a levitação magnética com supercondutores, os LEDs, a computação quântica, entre muitos outros exemplos.

Você sabia que as descobertas mais recentes da Física, sobretudo da Mecânica Quântica em relação ao mundo microscópico, têm contribuído com os avanços tecnológicos?

A Mecânica Quântica tem sido considerada como o princípio básico de funcionamento de diversos equipamentos. Mas você faz ideia do quão recente são essas teorias quânticas? Ou quem são os grandes nomes associados às mais recentes descobertas? E como seria possível transpor tais conhecimentos de forma didática em aulas de Física da Educação Básica?

Para te ajudar a responder questionamentos lembra-se de que você assumiu o papel de um diretor que precisa, com urgência, melhorar o índice de aprovação de seus alunos em exames de vestibular. Para isso, você está ministrando palestras, a estudantes do 3º ano do Ensino Médio, sobre os mais diversos temas da Física Moderna, buscando enfatizar aspectos históricos. No intuito de encerrar o ciclo de palestras com "chave-de-ouro", você decidiu abordar os principais avanços recentes da Física. Como você poderia organizar e conduzir suas palestras sob essa perspectiva?

Para que você possa organizar essa palestra, primeiro você precisará conhecer os principais aspectos históricos recentes de descobertas e desenvolvimentos na Física Moderna. Assim, nesta seção, você estudará os principais fatos históricos relacionados à Teoria Quântica de Campos, à Física de Partículas e Física Nuclear,

conhecendo as descobertas cada vez mais microscópicas, a descoberta do fenômeno de Supercondutividade e as principais implicações das teorias quânticas para os avanços científico e tecnológicos, enfatizando a perspectiva do desenvolvimento dos computadores quânticos.

Chegou a hora de adentrar no fascinante mundo de algumas das descobertas da Física que permitiram as maravilhas tecnológicas que facilitam nossas vidas nos dias atuais. Descobertas essas que conduziram seus descobridores ao prêmio tão esperado por todos os cientistas, o prêmio Nobel.

Bons estudos!

Não pode faltar

A radioatividade e a Física Nuclear

Atualmente sabemos sobre os perigos da radioatividade. Mas, você acredita que antigamente pessoas até carregavam elementos radioativos no bolso?

Em 1895, ao realizar experimentos com tubos de raios catódicos, o físico alemão Wilhelm Röntgen (1845-1923) descobriu uma radiação que hoje conhecemos como raios X. Esses raios eram capazes de atravessar a maioria dos obstáculos, permitindo, inclusive, "fotografar" o interior do ser humano por meio de placas fotográficas.

Os raios X são um tipo de radiação eletromagnética, sua descoberta permitiu um grande salto na História da Física, e foram descobertos pelo físico Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) quem descobriu os raios X provenientes de tubos de raios catódicos, verificando que eles atravessavam uma camada de papel escuro.

Já a descoberta da radioatividade, deve-se ao físico francês Antoine Becquerel (1852-1908), e se deu a partir de um experimento em que visou detectar os raios X presentes no fenômeno da fluorescência. Becquerel acreditava que o urânio emitia raios X quando exposto à luz do Sol. Ele preparou seu experimento, mas precisou aguardar por um dia ensolarado, então guardou o urânio junto com as chapas fotográficas em um local protegido. Em um dia de sol, ao buscar seu equipamento, ele realizou seu experimento mas notou que as chapas fotográficas já tinham sido

marcadas, e a explicação possível era que o urânio emitia a radiação independentemente de ser exposto ao Sol. Assim, descobriu-se que existem elementos naturalmente radioativos.

As recém-descobertas sobre radioatividade chamaram a atenção do casal Pierre Curie (1859-1906) e Marie Curie (1867-1934). Em 1898, Marie Curie investigou diversos cristais, percebendo que todos os que continham urânio apresentavam características radioativas. Um dos cristais investigados era mais radioativo do que o próprio urânio metálico (puro), o que levou Marie Curie a trabalhar com a hipótese de que o cristal estudado deveria conter elementos mais radioativos do que o próprio urânio. O desenvolvimento atraiu a atenção da comunidade científica e também do próprio Pierre Curie, que abandonou sua própria pesquisa para ajudar a esposa. Em pouco tempo, foram descobertos na composição de alguns desses cristais radioativos os elementos tório, rádio e polônio.

Marie Curie foi a primeira pesquisadora a receber dois prêmios Nobel: um de Física, em 1903 (junto com seu marido e com Becquerel), e um de Química, em 1911, ano em que conseguiu isolar o elemento rádio.

Em 1899, Ernest Rutherford (1871-1937) também havia realizado descobertas que contribuíram com a Física Nuclear. Ele submeteu os raios de um elemento radiativo a campos magnéticos, e descobriu que havia radiações de carga elétrica positiva, negativa e neutra.

A radiação gama não tem carga elétrica, de fato é um tipo de radiação eletromagnética, por isso, não são defletidos por campos magnéticos. São os raios com maior poder de penetração. A radiação beta se comportava como carga elétrica negativa (depois, descobriu-se tratarem-se de elétrons com elevadas energias). Por fim, a radiação alfa tinha carga elétrica positiva (o dobro da carga da radiação beta), é composta por núcleos do elemento hélio, que possuem dois prótons e dois nêutrons, e é a radiação com menor poder de penetração.

Utilizando radiação alfa, Rutherford foi capaz de descobrir maiores detalhes sobre a estrutura atômica. Ele produziu uma lâmina muito fina de ouro e a bombardeou com radiação alfa, que ele já sabia ser composta por partículas de grande massa e alta velocidade. Ele esperava que as partículas atravessariam o metal com velocidades reduzidas pela resistência da lâmina, mas, para

sua surpresa, a maioria das partículas passou pela lâmina sem ser defletida, enquanto poucas sofreram grandes deflexões. Assim, foi necessário levantar a hipótese de átomos com núcleos muito pequenos e pesados, através dos quais algumas partículas não foram capazes de atravessar, e grandes espaços ao redor por onde as partículas poderiam atravessar.

Lembramos que os raios-alfa são núcleos de hélio (dois prótons e dois nêutrons), os raios-beta são elétrons e os gama são fótons de alta energia. O núcleo mais estável é o de Ferro, e isso significa que a fusão de elementos mais leves emite energia, e a quebra de elementos mais pesados também. O ferro representa o estado de "menor energia" para a matéria. Assim, podemos compreender o funcionamento do Sol: atualmente em equilíbrio, emitindo muita energia em forma de calor e de luz graças a reações termonucleares que provocam a fusão de átomos leves para formar átomos mais pesados, em especial funde hidrogênio para formar hélio, o que permite a liberação de energia.

Assimile

Segundo o modelo padrão de física de partículas, o universo é dividido em quatro interações fundamentais: gravitacional, eletromagnética, forte e fraca. A força gravitacional e a eletromagnética caem com a razão de $1/r^2$, assim são interações capazes de se propagar à distância.

A força forte e a força fraca têm uma interação que cai muito mais rapidamente com a distância, assim pertencem naturalmente ao domínio do muito pequeno. A força forte é responsável por manter o núcleo atômico coeso (afinal, como tantas cargas elétricas positivas podem se manter unidas, considerando que existe a repulsão elétrica?), enquanto a força fraca permite interações que produzem cargas elétricas e está relacionada com o decaimento beta.

As descobertas sobre radioatividade foram muito importantes, pois a partir delas foram possíveis diversos avanços, como na medicina, ao permitir tratamentos cada vez mais avançados para o câncer e a realização de radiografias, bem como acarretaram nos avanços para a energia nuclear e, até mesmo, desenvolvimento

das famigeradas bombas atômicas. Além disso, essas descobertas foram importantes para a formulação do modelo atômico atual, e para os avanços da Física de Partículas.

Reflita

Que exemplos reais poderiam ser considerados na sala de aula da Educação Básica para atrair a atenção dos alunos a respeito dos estudos de radioatividade?

A Física de Partículas e a Física Nuclear

O estudo da Física de Partículas busca por conhecimento dos constituintes elementares da matéria e suas interações. Hoje sabe-se que a matéria é composta por átomos, que contêm um núcleo envolto por uma nuvem de elétrons. Esse núcleo é composto por prótons e nêutrons, que são estruturas complexas feitas de quarks. Os quarks junto com os léptons são considerados como os férmions fundamentais, ou seja, os constituintes últimos a partir dos quais a matéria é criada. Além dessas, foram descobertas as partículas de campo, os bósons, além de muitas outras partículas subatômicas.

O elétron foi o primeiro dos léptons a ser descoberto, em 1897, pelo físico britânico Joseph John Thomson (1856-1940). Em 1933, Dirac observou pela primeira vez a antipartícula do elétron, o pósitron, uma partícula que apresenta mesma massa que o elétron e todos os números quânticos inversos.

Outro lépton conhecido é o múon, descoberto em 1937, pelos físicos norte-americanos Carl David Anderson (1905-1991) e Seth Neddermayer (1907-1988). Tanto a descoberta do pósitron quanto do múon foram possíveis por meio de uma câmara de neblina. Essa câmara foi o primeiro detector capaz de mostrar aspectos produzidos por partículas subatômicas e foi inventada em 1873, pelo físico escocês Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959). Tal invenção consiste de uma câmara de interior saturado de vapor d'água ou álcool e quando partículas carregadas atravessam essa câmara, o gás sofre sua influência, resultando em partículas ionizadas atraídas ou repelidas, deixando um rastro visível da trajetória da partícula.

O último lépton descoberto é o neutrino. Pauli elaborou a teoria a respeito do decaimento beta, que ocorre quando "um isótopo

instável de algum elemento emite um elétron e se transforma em outro elemento" (CHERMAN, 2005, p. 154). Esse decaimento também ocorre no núcleo atômico, de modo que um nêutron se divide em um próton e um elétron, em que o primeiro permanece no núcleo e o segundo, é ejetado do átomo.

Durante o decaimento beta, alguns físicos perceberam que havia o desaparecimento de alguma energia, o que contradizia a lei da conservação de energia. Pauli, em 1930, previu que nesse processo uma outra partícula era emitida além do elétron. Essa partícula foi denominada pelo físico italino Enrico Fermi (1901-1954) como neutrino e foi observada pela primeira vez em 1956 por Frederick Reines (1918-1998).

Exemplificando

O caso mais famoso de decaimento beta é o do Carbono-14, utilizado por arqueólogos para estimar a data de objetos com base na meia-vida desse isótopo de carbono.

Em sala de aula, o professor de Física pode utilizar essa aplicação como motivação para introduzir aos alunos abordagens de Física Moderna sobre a Física de Partículas e a Física Nuclear e ainda propor um trabalho interdisciplinar junto ao professor de Química e de Matemática para abordar os conceitos de decaimento e de meia-vida. Nessa abordagem interdisciplinar, não pode faltar pesquisas direcionadas que levem os alunos a descobrirem como e por quem foram desenvolvidas tais teorias, e perceberem o quanto a Física Moderna esteve e continua estando atrelada ao desenvolvimento da Química e, até mesmo, da Matemática.

Em 1964, de maneira independente, o físico russo George Zweig (1937) e o físico norte-americano Murray Gell-Mann (1929) propuseram a existência de partículas elementares, que compõe prótons e nêutrons e todas as outras partículas conhecidas como hádrons. Essas partículas são atualmente conhecidas como quarks. Os quarks não podem ser observados isoladamente na natureza, mas a hipóteses na época de sua proposição é de que existiriam três espécies de quarks: *up*, *down* e *strange*. Hoje, são seis tipos: pp, down, strange, charm, bottom, top. As maiores evidências que se têm da existência de quarks advêm de experiências de

espalhamento inelástico profundo, que tiveram início na década de 60, no Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC), laboratório dos Estados Unidos pertencente à Universidade de Stanford, e que contém um acelerador linear de partículas, de três quilômetros de extensão.

Além de atribuir o nome ao neutrino, foi Fermi quem descobriu a "força fraca" de interação, utilizada para explicar o decaimento beta. Já a "força forte", existente entre as partículas que compõem o núcleo, foi descoberta pelo físico japonês Yukawa (CHERMAN, 2005).

Segundo o modelo padrão da física de partículas, o universo é dividido em quatro interações fundamentais. Para as quatro forças fundamentais de interações que ocorrem na natureza, a gravitacional, a eletromagnética, a fraca e a forte, está associada uma propriedade da partícula ou carga (carga gravitacional, carga elétrica, carga fraca e carga forte, respectivamente), e a força corresponde a uma ação no campo associado a essas partículas. A força fraca e a força forte foram descobertas nas primeiras décadas do século XX, em que a primeira é responsável por fenômenos de decaimentos radioativos e, a segunda, por coesão de núcleos atômicos.

Pesquise mais

Saiba mais sobre o modelo padrão da Física de Partículas lendo a resenha do livro *O discreto charme das partículas elementares*, disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/charme.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2018. Você também poderá compreender melhor essa abordagem assistindo ao vídeo da professora Carola Dobrigkeit Chinellato, do Instituto de Física da Unicamp, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hg9kJPdplWo>. Acesso em: 5 ago. 2018.

Na década de 1970, de maneira independente, os físicos norte-americano Sheldon Lee Glashow (1932), o físico Steven Weinberg (1933) e o físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996) contribuíram com a teoria unificada das interações fracas e eletromagnéticas entre partículas elementares, ao apontarem a existência de partículas denominadas de bósons, que não são limitadas pelo princípio da exclusão de Pauli e que são intermediárias de força fraca.

Pesquise mais

Saiba mais sobre os bósons e, sobretudo, sobre a unificação das forças eletromagnéticas e nuclear fraca lendo as páginas 11-19, do material *Partículas Elementares: a Procura das Partículas W e Z*, disponível em: <http://fei.edu.br/~rbianchi/publications/particulas-elementares.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2018.

Apresentamos na Tabela 4.1 a seguir os anos de descobertas dos principais férmions e bósons, respectivamente, além dos que já abordamos, para que você tenha conhecimento dos anos de suas descobertas e, assim, possa melhor direcionar suas pesquisas.

Tabela 4.1 | Férmions e Bósons (respectivamente): principais partículas que compõem o atual modelo padrão

<table>
<tr><th colspan="2">Léptons</th><th colspan="2">Quarks</th></tr>
<tr><td>Elétron
J. J. Thompson, 1897</td><td>Neutrino do elétron
Proposto por Pauli, 1930 e Descoberto por Peines, 1956</td><td colspan="2">Up Down
Próton (uud), Lord Rutherford, 1913.
Nêutron (udd), Chadwick, 1932.
Subestrutura de quarks proposta por Gell-Mann, Zweig, 1964.</td></tr>
<tr><td>Múon
Anderson, 1936</td><td>Neutrino do múon
Schwartz, Lederman e Steinberger, 1962</td><td>Charm
Richter, Ting, 1974</td><td>Strange
Rochester e Butler, 1947.</td></tr>
<tr><td>Tau
Perl, 1975</td><td>Neutrino do tau
Fermilab (EUA), 2000.</td><td>Top
Fermilab (EUA), 1994.</td><td>Bottom
Lederman, 1977.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fótons, 1905.</td><td>Bósons fracos, 1968.</td><td>Glúons, 1973.</td></tr>
</table>

Fonte: Cherman (2005, p. 168-9).

Note que, na Tabela 4.1, tanto para férmions, quanto para bósons, temos apenas três colunas. Porém, na natureza, temos quatro forças, segundo o modelo padrão estabelecido na Física de

Partículas. Portanto, uma delas não está contemplada na tabela. Falta, por exemplo, o bóson que transmite a interação gravitacional (CHERMAN, 2005), nomeado gráviton, mas ainda não descoberto.

Além disso, não se encontra na tabela o Bóson de Higgs, uma partícula subatômica, considerada como a chave para explicar a origem de massa de outras partículas. Esse bóson foi prenunciado em 1964 pelo físico britânico Peter Higgs (1929), porém, só foi possível dar início à constatação de sua existência em 2008, utilizando-se o Colisor de Hádrons (LHC), e, somente em 2013, foi possível realmente provar sua existência.

Pesquise mais

No campo de estudos da Física de Partículas existem, ainda, outras teorias que valem a pena você conhecer os contextos históricos, como o Bóson de Higgs e as teorias das cordas e supercordas. Para conhecer essas abordagens, leia as páginas 150-168 do livro *Sobre os ombros de gigantes: uma história da Física*, disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788537805671/cfi/6/32!/4/4/52/2/2/4/2/4@0:94.7>. Acesso em: 14 jul. 2018.

Teoria Quântica de Campos

A partir de agora, passamos estudar o desenvolvimento da teoria quântica de campos (que também já foi denominada de *segunda quantização*, por considerar, ao mesmo tempo, a quantização da matéria e dos condutores de força em um campo no vácuo), que corresponde à aplicação que compreende a mecânica quântica e a relatividade de campos, constituindo estruturas teóricas para a física de partículas e de matéria condensada.

As primeiras ideias a respeito de campo têm origem nos primeiros conceitos postulados por Isaac Newton (1643-1727) a respeito da Mecânica e nas primeiras tentativas de descrever forças. Mas foi sobretudo a partir dos trabalhos de James Clerk Maxwell (1831-1879) que o conceito de campo ganhou destaque. Além das descobertas relativas a associações entre eletricidade e magnetismo, a Física passou por uma grande revolução, sobretudo com as contribuições de Albert Einstein (1879-1955), Max Planck (1858-1947), Niels Bohr (1885-1962), entre muitos outros.

A Teoria Eletromagnética de Maxwell descrevia a propagação ondulatória da luz, mas Einstein, em um dos seus artigos de 1905, intitulado *Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*, propôs que um raio luminoso seria composto por partículas, denominados, mais tarde, de *fótons*. Com essa proposição, Einstein estabeleceu a ideia de quantização do campo eletromagnético, dando início aos estudos modernos da *Teoria Quântica de Campos*. A teoria quântica de campos fornece uma nova concepção sobre o campo eletromagnético (DIONÍSIO, 2005).

Ocorreram outras descobertas relativas às partículas além do *fóton*, proposto por Einstein, fundamentado em ideias de Planck. Em 1925, dois físicos holandeses, Samuel Goudsmit (1902-1978) e George Uhlenbeck (1900-1988), visando formular explicações para algumas observações na estrutura fina do espectro dos átomos, que a Física Clássica não era suficiente para explicar, propuseram a hipótese de que os elétrons possuíam movimento de rotação, o que hoje denomina-se por *spin*, podendo essa rotação acontecer em dois sentidos diferentes, *spin up* e *spin down* (para o elétron são dois, *up* e *down*, mas outras partículas tem diferentes números). Dessa forma, diferente do que Bohr pensava, os elétrons não eram indistinguíveis, sendo a rotação um fator que os diferenciava (CHERMAN, 2005). O spin é um conceito mais geral, e todas as partículas tem o número quântico chamado spin. As que têm spin fracionário são denominadas férmions, e as que têm spin inteiro são denominadas bósons. O fóton tem spin 1 (bóson), o elétron tem spin ½ (férmion).

Também foi em 1925 que o físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) construiu o princípio que hoje leva seu nome, o *Princípio da Exclusão de Pauli*, proposto a partir da problemática com as camadas eletrônicas e a relação com o sistema periódico, determinando que cada orbital atômico não pode ser ocupado por mais de dois elétrons ao mesmo tempo e que não é possível que dois elétrons em um átomo tenham o mesmo conjunto de números quânticos. Vale destacar que dois elétrons não podem compartilhar um orbital atômico caso tenham os mesmos números quânticos.

Na década de 1930 só eram conhecidos os campos eletromagnético e gravitacional. Após finalizar o desenvolvimento da Relatividade Geral, Einstein dedicou-se a quantizá-los para unificar todas as leis da Física. Não teve sucesso e, até hoje, não se conseguiu construir uma teoria unificada, apesar de muitas décadas de esforços.

Pesquise mais

O Princípio da Exclusão de Pauli e as ideias defendidas por Goudsmit e Uhlenbeck, de certa forma se referiam à mesma coisa, pois os dois valores possíveis do número quântico de Pauli corresponderiam às duas possibilidades de sentido dos *spins*. Para saber mais sobre ambas as concepções, leia as páginas 499-504 do artigo *Schola quantorum: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica, Parte I: desenvolvimento histórico, 1913-1925*, disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ss/v1n4/a03v1n4.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2018.

O físico britânico, Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), em 1927, inaugurou a *eletrodinâmica quântica*, também conhecida por QED (*Quantum Electro-Dynamics*), após aplicar a equação de Schrödinger ao campo eletromagnético, provocando uma segunda quantização, trazendo, dessa forma, o eletromagnetismo para os estudos da Mecânica Quântica. O seu modelo de segunda quantização descrevia a interação eletromagnética como uma troca de *fótons*.

Com base no modelo de Dirac, em 1935, o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) propôs a existência de uma força nuclear que mantinha os prótons e nêutrons unidos no núcleo atômico (CHERMAN, 2005). Essa força, segundo Yukawa, seria transmitida por uma partícula pesada, que foi posteriormente denominada de *méson*.

A teoria da eletrodinâmica compreende um domínio intermediário entre o microscópico e o macroscópico, visando fornecer de maneira completa explicações para fenômenos físicos existentes entre um núcleo atômico e um planeta. Nesse domínio, destacaram-se, de maneira independente, as descobertas dos físicos Julian Schwinger (1918-1994), Richard Feynman (1918-1988) e Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979). Ao se aplicar as QED experimentalmente, recorria-se a métodos aproximados (ou perturbativos) e obtinha-se resultados sem sentido, muitas vezes, valores que tendiam ao infinito. Os três físicos reformularam a compreensão da eletrodinâmica quântica ao fornecerem, de maneira independente, as mesmas elucidações para as anomalias que inibiam a utilização da QED para explicar fenômenos do domínio intermediário (BRENNAN, 2003).

O problema do QED, resolvido por Tomonaga, Schwinger e Feynman consistiu na inclusão de um número variável de partículas, um método que passou a ser denominado de *renormalização* e que se tornou objeto de estudo para a abordagem que foi denominada de Teoria Quântica de Campos.

Ainda que os três físicos tenham apresentado os mesmos resultados e, por isso, tenham partilhado do Prêmio Nobel da Física em 1965, dentre eles, destacamos Feynman, formado em Física pelo MIT (Instituto de Tecnologia de Massachussetts) e pós-graduado em Física pelo Instituto de Estudos Avançados de Pinceton. Foi durante sua pós-graduação que ele realizou pesquisas com John Archibald Wheeler (1911-2008), junto ao qual deu os primeiros passos para ingressar nos estudos da teoria da eletrodinâmica quântica.

Devido ao ataque a Pearl Harbor, em 1941, Feynman mudou-se para Los Alamos, no Novo México, momento em que ingressou no Projeto Manhattan, o qual foi um projeto de pesquisa e desenvolvimento que produziu as primeiras bombas atômicas durante a Segunda Guerra Mundial. Após esse projeto, ele assumiu o cargo de professor na Universidade de Cornell, em Nova York, em que retomou seus estudos a respeito de uma nova abordagem para a mecânica quântica. Em 1949, ele publicou os artigos *A teoria dos pósitrons* e *Abordagem espaço-temporal à eletrodinâmica quântica*, em que ele introduziu diagramas simples capazes de representar graficamente colisões de partículas subatômicas e abreviar os cálculos que previam o resultado dessas colisões (BRENNAN, 2003). Esses diagramas são denominados *Diagramas de Feynman*, considerados como contribuições importantes para o campo da eletrodinâmica quântica. Portanto, foi Feynman quem propôs um método novo de calcular a probabilidade de um evento quântico por meio dos *diagramas de Feynman*, o que permite estudar a posição de um elétron considerando todos os caminhos possíveis que o mesmo possa ter percorrido (CHERMAN, 2005).

Supercondutividade e a Física na Computação

Dentre as fascinantes descobertas mais recentes na Física Moderna não podemos deixar de mencionar a do físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), que, em 1911, na Universidade de Leiden, nos Países Baixos, conseguiu liquefazer o hélio pela

primeira vez, o que o conduziu à descoberta muito relevante para a área da Física de temperaturas baixas, a *supercondutividade* (COSTA; PAVÃO, 2012).

Onnes estava estudando a condutividade do mercúrio em baixas temperaturas e descobriu que abaixo de cerca de 4 K, esse elemento perdia totalmente a resistividade elétrica, tornando-se um condutor perfeito, ou seja, um supercondutor (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2010). Isso aconteceu repentinamente e sua resistividade foi nula. Dessa forma, ao estabelecer uma corrente no material supercondutor, a mesma permanecerá constante, independentemente da presença de campo elétrico. A temperatura na qual o material se torna supercondutor é denominada de temperatura crítica T_c.

O surpreendente fenômeno de supercondutividade independe do material ser um bom condutor, como os metais. Dessa forma, "o mecanismo que causa a supercondutividade pode diferir daquele mecanismo que causa a condutividade de metais usuais" (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2010, p. 259). Tal fenômeno só foi observado três anos após Onnes liquefazer o hélio e, devido à sua descoberta, ele recebeu o prêmio Nobel de Física em 1913.

Uma explicação satisfatória para o fenômeno observado por Onnes surgiu muitos anos depois, com o advento da teoria BSC (*Bardeen-Cooper-Schrieffer*), teoria da supercondutividade que "mostra que o sistema eletrônico contém a menor energia possível se os elétrons são ligados juntos aos pares, chamados de pares de Cooper" (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2010, p. 259).

Hoje, a ciência busca ativamente por materiais supercondutores a teorias mais altas, e a supercondutividade a temperatura ambiente seria um avanço sem precedentes, pois permitiria a transmissão de energia elétrica sem perdas (e também sem custos com resfriamento). Um exemplo que podemos mencionar sobre aplicação da supercondutividade são os trens de levitação magnética por supercondutividade.

Não é difícil de imaginar que a descoberta da supercondutividade proporcionou contribuições significativas para o desenvolvimento científico e tecnológico e, já que estamos falando de tecnologia, não podemos deixar de mencionar o papel da Física Quântica para a computação.

A ciência da computação teve origem com o trabalho desenvolvido pelo matemático inglês Alan Turing (1912-1954), em 1936. Foi ele quem desenvolveu a forma abstrata do computador programável, operando com sequências lógicas de unidades de informação denominadas de *bits*, que podem adquirir os valores 0 ou 1. Destacamos aqui que a Mecânica Quântica teve um papel no desenvolvimento dos transistores e nos HDs.

Pelo princípio da superposição na Física Quântica, introduziu-se o conceito de *QuBit* (Bit Quântico), que permite que um *bit* possa estar em um estado de superposição entre ambos os valores, podendo estar simultaneamente em mais de um estado (FALCÃO; MOLINARI, 2016). O conceito teórico de computador quântico surgiu na década de oitenta, do século passado, mas ainda hoje não temos computadores quânticos completos, pois ainda temos desafios técnicos que não foram superados para a construção de máquinas funcionando com esse princípio.

A principal diferença entre o bit e o bit quântico é que o segundo possibilita a realização de um fenômeno chamado de *emaranhamento*, que permite "que um conjunto de bits faça uma correlação de maneira superior ao sistema clássico" (FALCÃO; MOLINARI, 2016, p. 93). A computação quântica permite uma nova forma de programação, já que os resultados não são sempre binários, podemos ter três ou mais resultados. Isso faz com que problemas intratáveis em termos de tempo de processamento possam ser acelerados.

O emaranhamento quântico "é um fenômeno da mecânica quântica que permite que dois ou mais objetos estejam de alguma forma tão ligados que um objeto não possa ser corretamente descrito sem que a sua contra-parte seja mencionada" (BONO, 2010, p. 108), mesmo que estes estejam separados espacialmente, influenciando-se entre si, ainda que não atinja a velocidade da luz,

> **essas fortes correlações fazem com que as medidas realizadas num sistema pareçam estar influenciando instantaneamente outros sistemas que estão emaranhados com ele, e sugerem que alguma influência estaria a propagar-se instantaneamente entre os sistemas. (BONO, 2010, p. 108)**

Sem medo de errar

Ao ministrar a palestra sobre os mais diversos temas da Física Moderna para alunos do 3º ano do Ensino Médio, você decidiu abordar os principais avanços recentes da Física, contemplando seus aspectos históricos.

Pensando em como fazer essa apresentação de maneira didática, ajustando o nível de dificuldade a essa etapa de ensino, você poderia considerar de que maneira seria possível transpor a abordagem sobre Física de Partículas que estejam ao alcanço do entendimento desses alunos e de modo que possa despertar a atenção deles.

Assim, você poderia começar apresentando cenas de filmes que tratam sobre o acelerador de partículas, como cenas do filme *Anjos e Demônios*, de 2009, baseando no livro de mesmo nome, escrito por Dan Brown. Logo no começo do filme, há uma cena que faz menção a colisão de partículas no LHC (Large Hadron Collider), o maior acelerador de partículas do mundo, localizado em Genebra, na Suíça, formado por um enorme tubo circular subterrâneo que tem circunferência de 26,7 quilômetros e diâmetro de 7 metros. Usando esse vídeo como introdução, você poderia orientar os alunos a pesquisarem na internet de seus celulares algumas palavras-chave, como colisão de partículas, acelerador de partículas, partículas elementares, enfim, buscando subsídios para dar início às suas apresentações históricas sobre o desenvolvimento da Física Quântica em relação à Teoria de Campos e Física de Partículas Elementares.

Após esse momento de apresentação de cenas do filme, você poderia apresentar o vídeo, *Acelerador LHC* é acionado, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qOsgRPhlVB8>. Acesso em: 14 jul. 2018. Após, você poderia promover debates, conduzindo os alunos a refletirem e argumentarem sobre as consequências tecnológicas e sociais das pesquisas desenvolvidas sobre Física de Partículas. Você também poderia dar início a abordagens mais técnicas, discutindo as partículas elementares que constituem os átomos (prótons, nêutrons, férmions, bósons, quarks, etc), enfatizando o contexto de suas descobertas, permitindo aos alunos pesquisarem e discutirem sobre os impactos dessas descobertas para cada época. Nesse momento, você poderia auxiliar os alunos a diferenciarem partículas de partículas elementares. Partículas

elementares são aquelas que não podem ser subdivididas. Prótons e neutros são compostos de quarks, então não são elementares. Partículas elementares são, por exemplo: quarks, elétron, neutrino, fóton, entre outros. Férmions e bósons não são partículas, são classificações de partículas a partir do spin.

Você poderia ainda, após o vídeo, propor questões como: a) Por que precisamos de um tubo tão grande (27 km) para acelerar as partículas? b) Por que a temperatura nos tubos tem que ser tão baixa?

Assim, você poderá aproveitar para promover novas abordagens, como mencionar a descoberta da *supercondutividade* em temperaturas muito baixas e discutir sobre a importância dessa descoberta para a tecnologia.

Em seguida, você poderia levar seus alunos ao laboratório de informática da escola para explorarem alguns simuladores que oportunizarão conhecer alguns conceitos básicos sobre o funcionamento de um acelerador de partículas, enfatizando as forças de atração e interações envolvidas no modelo padrão (FERNANDES, 2017).

Como você já teria nesse momento falado sobre as partículas elementares, você poderia dar início às discussões sobre física nuclear e, em seguida, poderia oportunizar aos alunos um primeiro contato com o modelo padrão por meio dos simuladores PhET, disponíveis em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/search?q=decaimento>. Acesso em: 15 jul. 2018. Por meio desses simuladores, é possível explorar o decaimento beta, discutindo descobertas de Rutherford, e até mesmo realizar o jogo de Datação Radioativa, possibilitando abordagens históricas sobre a radioatividade (FERNANDES, 2017).

Outro simulador que você também poderia utilizar é o SPRACE GAME, disponível em: <https://www.sprace.org.br/sprace-game/sprace-game-v2-pt>. Acesso em: 15 jul. 2018. Por meio desse jogo, o aluno terá a oportunidade de conhecer as principais descobertas da física de partículas do último século, em que a identificação de partículas é necessária para ajustar o banco de dados da nave, prevendo fases em que o aluno precisará construir prótons e nêutrons utilizando partículas elementares em quantidades suficientes para que seja possível a construção dos átomos (FERNANDES, 2017).

Diante das várias sugestões de direcionar a sua última palestra, o que vale ressaltar é que todos os momentos são oportunos para incluir a História da Física como recurso metodológico para tornar a aprendizagem mais prazerosa e significativa

Avançando na prática

Explorando a Física de Partículas por meio de jogos e exposições

Descrição da situação-problema

Você é um professor de Física da Educação Básica que deseja abordar com seus alunos do 3º ano do Ensino Médio o tema Física de Partículas. Você conhece diversos simuladores para computador e aplicativos para celulares, mas, considerando a realidade de seus alunos, que são de uma escola pública com poucos recursos, precisa pensar em outras alternativas. De que maneira você poderia propor abordagens sobre Física de Partículas aos seus alunos despertando a curiosidade e interesse dos mesmos?

Resolução da situação-problema

Uma alternativa metodológica seria propor um jogo de cartas. Você mesmo poderia confeccionar as cartas ou solicitar aos alunos essa construção. Para o jogo, as cartas precisariam ser confeccionadas com representações figurativas de partículas do modelo padrão. Para o jogo, os alunos poderiam ser organizados em grupos de quatro alunos, que receberiam 52 cartas. O objetivo é que cada aluno do grupo tente formar bárions, a partir do conjunto de cartas com partículas elementares que receberem. Ganhará o aluno que formar bárions mais pesados ou com spin mais alto.

Para isso, considerando o nível de ensino, buscando evitar que os alunos produzam partículas que não existem, o professor poderia propor algo mais informal, citando ao menos os exemplos mais simples, baseados nos quarks *up* e *down*, próton (*uud*) e nêutron (*udd*).

Outra proposta metodológica que poderia ser adotada seria organizar uma exposição para os demais alunos da escola com

o tema "O mundo das partículas". Para essa exposição, os alunos poderiam preparar textos explicativos, figuras, vídeos-curtos, entre outros, com resultados de pesquisas sobre determinadas partículas. Assim, os alunos poderiam ser divididos e pequenos grupos para que fiquem responsáveis pelo estudo específico de determinadas partículas (CUEVAS; ÁVILA; VIVANCO, [s. d.]).

Faça valer a pena

1. Faça a relação correta:
1 – James Clerk Maxwell.
2 – Wolfgang Ernst Pauli.
3 – Paul Adrien Maurice Dirac.
4 – Richard Philips Feynman.

( ) Sua teoria clássica sobre campos foi a base da Relatividade Restrita de Einstein e fundamental para o desenvolvimento posterior da mecânica quântica.
( ) Ao aplicar a equação de Schrödinger ao campo eletromagnético e provocar uma segunda quantização, ele inaugurou a eletrodinâmica quântica.
( ) Desenvolveu um método para se fazer cálculos na teoria quântica de campos.
( ) Formulou o princípio que estabelece que férmions no mesmo estado quântico não podem compartilhar um mesmo orbital.

Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, a relação correta:

a) 1, 2, 3 e 4.
b) 1, 3, 4 e 2.
c) 2, 3, 4 e 1.
d) 3, 2, 1 e 4.
e) 4, 1, 2 e 3.

2. Ernest Rutherford é considerado o pai da Física de Partículas, tendo sido ele o primeiro a provar que os núcleos atômicos são compostos por partículas menores. Hoje sabe-se que a matéria é constituída por átomos, cujo núcleo é composto por _____ e _____, que por sua vez são compostos por partículas elementares chamadas _____. Ao redor do núcleo atômico estão os _____, ainda considerados atualmente como partículas elementares.

Assinale a alternativa que, respectivamente, preenche corretamente a coluna:

a) prótons; nêutrons; bósons; elétrons.
b) prótons; elétrons; quarks; bósons.
c) nêutrons; elétrons; férmions; prótons.
d) nêutrons; elétrons; bósons; férmions
e) prótons; nêutrons; quarks; elétrons.

3. Heike Kamerlingh Onnes, em 1911, fez com que os olhares de diversos pesquisadores se voltassem para a Universidade de Leiden ao realizar uma descoberta que viria a proporcionar diversas contribuições para as áreas científica e tecnológica. Após o sucesso em liquefazer o Hélio, Onnes também descobriu o fenômeno de supercondutividade, a partir de outro experimento realizado, dessa vez, com o mercúrio.
A respeito desse fenômeno, julgue cada uma das afirmativas a seguir como verdadeira (V) ou falsa (F):
( ) Os supercondutores contemplam uma classe de materiais que possuem resistência elétrica zero abaixo de uma abaixo de suas temperatura crítica.
( ) Os supercondutores são elementos com uma condutividade elétrica muito alta quando submetidos a temperatura elevada, considerada como crítica.
( ) A supercondutividade é uma característica que alguns materiais apresentam quando submetidos a baixa temperatura, podendo conduzir corrente elétrica sem resistências.
( ) Hoje são conhecidos elementos supercondutores a temperatura ambiente.

Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, as valorações corretas para cada afirmativa:

a) V, V, F, V.
b) V, F, V, F.
c) V, F, F, F.
d) F, F, V, V.
e) F, V, V, F.

Referências

BEZERRA, V. A. Schola quantorum: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica Parte I: desenvolvimento histórico, 1913-1925. **Scientiae Studia**, v. 1, n. 4, p. 463-517, 2003.

BONO, E. **Uma revolução quântica:** consciência ou matéria. Porto Alegre, 2010.

BONJORNO, J. R. et al. **Física:** eletromagnetismo, física moderna, 3º ano. 3. ed. São Paulo: FTD 2016.

BRENNAN, R. P. **Gigantes da Física:** uma história da física moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro, Jorge Zahar Ed., 2003.

CHERMAN, A. **Sobre os ombros de gigantes:** uma história da física. 2. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2005.

COSTA, M. B. S.; PAVÃO, A. C. Supercondutividade: um século de desafios e superação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 2602.1-2602.14, 2012.

CUEVAS, F. J. P.; ÁVILA, O.; VIVANCO, F. A. J. **Aula: introdução aos conceitos básicos de física de partículas.** Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/27619/mod_resource/content/1/Plano%20de%20Aula%20GT02.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2018.

DIONÍSIO, P. H. Albert Einstein e a Física Quântica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 22, n. 2, p. 147-164, 2005.

DIONÍSIO, P. H. Física Quântica: de sua pré-história à discussão sobre o seu conteúdo essencial. **Cadernos IHU ideias**, ano 2, n.22, 2004. Disponível em: <http://www.ihu.unisinos.br/images/stories/cadernos/ideias/022cadernosihuideias.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2018.

FALCÃO, G. B. N.; MOLINARI, R. Historico, estado e perspectivas da tecnologia da computação quântica. **Revista UNILUS Ensino e Pesquisa**, v. 13, n. 31, p. 88-100, 2016.

FERNANDES, S. S. Física de partículas no Ensino Médio? Propostas de atividades que estão ao alcance dos nossos alunos! **Física em Revista - Cadernos de Ensino do Colégio Pedro II**, v. 1, n. 1, p. 1016-1031, 2017.

GOMES, M. O. C. **Teoria Quântica dos Campos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

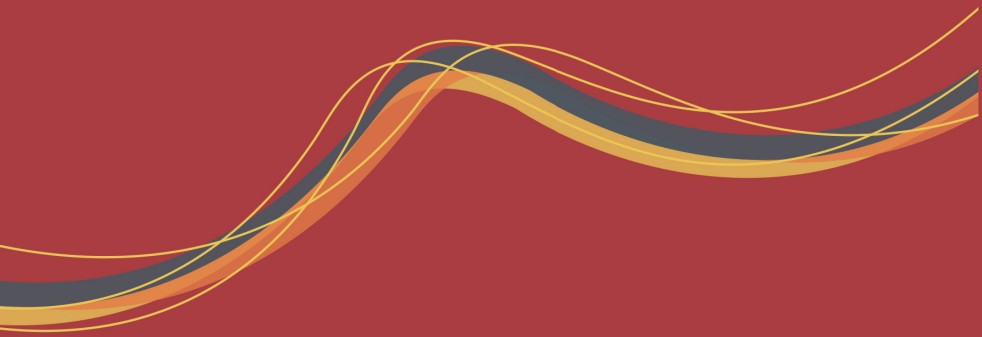
HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física, 4**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

HEWITT, P. G. **Física conceitual.** 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

_____. **Física Conceitual.** 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

MUNIZ, S. R. **Introdução à teoria da relatividade.** São Paulo: Escola de Física Contemporânea, IFSC-USP, 2015. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/358424/mod_resource/content/0/Relatividade_SRM__EFC-2015_v3.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2018.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros, volume 3:** física moderna: mecânica quântica, relatividade e a estrutura da matéria. Rio de Janeiro: LTC, 2017.



ISBN 978-85-522-1135-8