INÉRCIA E ESPAÇO ABSOLUTO EM TRÊS TEORIAS MECÂNICAS

Cairo Henrique Vaz Cotrim[1], Daniel Ordine Vieira Lopes[2], João Paulo Martins de Castro Chaib[3]

[1] Instituto Federal de Goiás – Câmpus Formosa, cairo.h.vaz@gmail.com

[2] Instituto Federal de Goiás – Câmpus Formosa, daniel.ordine@ifg.edu.br

[3] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Campus Timóteo. jopachaib@gmail.com

Resumo

A mecânica newtoniana, fundamental nos estudos de física básica, carrega consigo a noção de um espaço absoluto, através do qual também se define o conceito de inércia. Um dos problemas que levou Einstein a formular o princípio da equivalência que seria base para a relatividade geral foi a igualdade entre massa inercial e massa gravitacional. Uma outra teoria mecânica, proposta por Assis, busca implementar os princípios de Ernst Mach de que uma teoria deveria depender somente de grandezas relativas, sem depender, portanto, da noção de espaço absoluto. Exploramos diferenças entre essas três teorias da mecânica a respeito dos conceitos de inércia e espaço absoluto. Por meio delas, os autores Isaac Newton, Albert Einstein e André Assis apresentam bases onto e epistemologicamente diferentes para a física, sendo as visões sobre a relatividade do movimento, a natureza do espaço e do tempo e a origem da inércia algumas principais divergências. Através da comparação, é possível uma compreensão mais significativa desses conceitos, que pode ser usado no ensino de física.

Palavras-chave: Princípio de Mach, Mecânica, Relatividade.

Introdução

Diversos autores na área de ensino de ciências apontam a importância de se abordar no ensino de ciências história e filosofia das ciências como forma de não apenas aprofundar nos estudantes a compreensão dos conceitos científicos estudados, mas também de reduzir visões estereotipadas do que é a ciência, o cientista e o fazer ciência (ver por exemplo Matthews (1995), Seroglou e Koumaras (2001), Kominsky e Giordan (2002)).

Apesar de a mecânica clássica ou newtoniana fundamentar boa parte do ensino de física básica, ela apresenta conceitos muitas vezes contraintuitivos para estudantes, como a inércia (Monteiro; Martins, 2015) e o espaço absoluto (Buscatti Junior, 2014). Esses conceitos eventualmente são abordados de forma pouco aprofundada ou mesmo distinta de como foram historicamente construídos, por exemplo pelo próprio Isaac Newton (Chaib; Aguiar, 2016). Buscatti Jr (2014) aponta ainda como estudantes de licenciatura podem desconhecer diferentes significados ou interpretações para o conceito de “espaço”, principalmente nas diferenças epistemológicas deste conceito ao longo da história da ciência.

Pensando nessas diferenças entre conceitos basilares da mecânica, neste trabalho buscamos apresentar um contraste entre três teorias mecânicas: a Mecânica Clássica ou Newtoniana, a Mecânica Relativística de Albert Einstein, e a Mecânica Relacional, desenvolvida por André Koch Assis e baseada em princípios de Ernst Mach, principalmente no que as três teorias diferem a respeito das concepções de inércia, movimento e espaço absoluto.

Grandezas absolutas e relativas para Isaac Newton

Isaac Newton inicia o Livro I do Principia apresentando algumas definições importantes, como quantidade de matéria, quantidade de movimento e força. Ele não tenta definir o significado de espaço e tempo, mas faz diferenciação entre absoluto e relativo:

> I - O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração. O tempo comum aparente e relativo é uma medida de duração perceptível e externa (seja ela exata ou irregular) que é obtida por meio de movimento e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro, tal como uma hora, um dia, um mês, um ano.
>
> II - O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel. Espaço relativo é alguma dimensão ou medida móvel dos espaços absolutos, a qual nossos sentidos determinam por sua posição com relação aos corpos, e é comumente tomado por espaço imóvel; assim é a dimensão de um espaço subterrâneo, aéreo ou celeste, determinado pela sua posição com relação à Terra. Espaços absoluto e relativo são os mesmos em configuração e magnitude, mas não permanecem sempre numericamente iguais. Pois, por exemplo, se a Terra se move, um espaço de nosso ar, o qual relativamente à Terra permanece sempre o mesmo, será em algum momento parte do espaço absoluto pelo qual o ar passa; em um outro momento será outra parte do mesmo, e assim, com certeza, estará continuamente mudando (Newton, 2012, p. 40).

Ao dizer que no universo existe um “tempo absoluto”, Newton não apenas quer dizer que a passagem do tempo não pode ser contraída ou dilatada (conforme contrariado posteriormente pela mecânica relativística), mas também que o tempo não possui “relação com qualquer coisa externa”. Ou seja, o tempo para Newton é algo metafísico que não depende do mundo material para existir e nem sequer pode ser alterado por este.

O tempo relativo (não confundir com a relatividade do tempo de Einstein), entretanto, é a medida do tempo absoluto obtida a partir de interações entre corpos materiais, observando o início de determinado fenômeno até o seu fim. Exemplos de tempos relativos são a medição de um dia a partir da rotação da Terra em torno do próprio eixo, de um ano a partir da translação da Terra em torno do Sol ou de quaisquer múltiplos dessas medições.

Newton aplica a mesma análise para diferenciar o espaço absoluto e o espaço relativo. O espaço absoluto é, assim como o tempo absoluto, imutável por quaisquer movimentos dos corpos materiais e independentemente da existência deles. O espaço relativo é uma medição do espaço absoluto tomando como referência algum corpo e, portanto, é dependente do mundo material para existir e ser modificado.

Para diferenciar o espaço que permeia todo o universo do espaço ocupado por algum corpo material, Newton define o conceito de “lugar”. Lugar é uma região do espaço, podendo ser absoluto ou relativo a depender do espaço analisado. Com isso, ele define o movimento:

> IV - Movimento absoluto é a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro; e movimento relativo, a translação de um lugar relativo para outro. Assim, em um navio que está navegando, o lugar relativo de um corpo é aquela parte do navio que o corpo ocupa; ou aquela parte da cavidade que o corpo preenche, e que, portanto, move-se junto com o navio; repouso relativo é a permanência do corpo naquela mesma parte do navio ou de sua cavidade.

> Mas repouso real, absoluto, é a permanência do corpo na mesma parte daquele espaço imóvel, no qual o próprio navio, sua cavidade e tudo o que ele contém, se move (Newton, 2012, p. 40–41).

Como o espaço absoluto não pode ser observado diretamente pelos sentidos humanos, utilizamos o espaço relativo para estudar a cinemática dos corpos. É difícil (ou até impossível) concluir que um corpo está em movimento absoluto, mas podemos facilmente descobrir se está em movimento relativo em relação a outro por meio dos lugares relativos. Dessa forma, Newton utiliza o espaço relativo de uma maneira semelhante à que utilizamos referenciais ou sistemas de referência para estudar os movimentos relativos.

Já que espaço absoluto e tempo absoluto são metafísicos e não possuem qualquer relação com o mundo material, por que introduzi-los na física? A resposta de Newton reside na ideia de que movimentos absolutos e movimentos relativos podem ser distinguidos entre si, de tal forma que existem movimentos puramente absolutos (verdadeiros) e movimentos puramente relativos (falsos):

> As causas pelas quais os movimentos verdadeiros e relativos são diferenciados, um do outro, são as forças imprimidas sobre os corpos para gerar movimento. O movimento verdadeiro não é nem gerado nem alterado, a não ser por alguma força imprimida sobre o corpo movido; mas o movimento relativo pode ser gerado ou alterado sem qualquer força imprimida sobre o corpo. (Newton, p. 48)

Logo, o movimento verdadeiro não pode ser inferido a partir de outros corpos materiais. Para Newton, deve haver algum referencial universal que pode ser utilizado a todo momento para esse movimento. Esse referencial é o espaço absoluto, pelo qual se dá todos os lugares absolutos e os seus deslocamentos. Ademais, ele usa os experimentos de um balde com água girando e o experimento dos dois globos para defender a existência do espaço absoluto (NEWTON, 2012, p. 49-51). Para analisar a inércia newtoniana, vamos estudar a segunda lei da mecânica newtoniana na próxima seção.

Forças inerciais para Newton

A segunda lei do movimento como foi concebida por Newton trata da aceleração dos corpos com relação ao espaço absoluto. A equação de movimento de um corpo C qualquer é

$$\vec{F} = m_i \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = m_i\vec{a}, \tag{1}$$

onde $\vec{F}$ é a força resultante impressa por outros corpos materiais em C, m_i é a massa inercial de C, $\vec{r}$ é a sua posição em relação à origem de um referencial que coincide com o do espaço absoluto (que coincide com o das “estrelas fixas”), $\vec{a} = d^2\vec{r}/dt^2$ e é a aceleração do corpo em relação ao espaço absoluto. Como aponta Chaib e Aguiar (2016), Newton em seus escritos trata a inércia como uma força de resistência e impulso inerente ao próprio corpo quando este muda seu movimento retilíneo e uniforme com relação ao espaço absoluto. Quando uma força $\vec{F}$ é aplicada sobre corpo, este adquirirá uma aceleração $\vec{a} = d^2\vec{r}/dt^2$ em relação ao espaço absoluto e, ainda no mesmo instante, adquire uma força inercial, intrínseca ao corpo, proporcional a $\vec{a}$, no sentido contrário a $\vec{F}$ e de mesma intensidade. Essa força adquirida explicaria por exemplo o aumento da tração observada em um cabo quando se aumenta a

velocidade angular do corpo girado por esse cabo a uma distância $\vec{R}$ do centro de rotação, de maneira que, de maneira mais explicita a equação (1) se torna

$$\vec{F} = m_i \left(\left(\vec{\omega} \times \vec{R} \right) \times \vec{\omega} \right). \quad (2)$$

Aqui, $\vec{\omega}$ é o vetor velocidade angular do corpo com relação ao espaço absoluto.

Se assumirmos, ao contrário de Newton, uma aceleração $\vec{a}'$ na equação (1) no lugar de a, onde a' é a aceleração do corpo em relação a um referencial arbitrário S', isso muda a equação (1) conceitualmente, pois $\vec{a}'$ coincidirá com a aceleração em relação ao espaço absoluto a apenas para os chamados "referenciais inerciais". Se o referencial S' estiver acelerado com relação ao espaço absoluto, esse é chamado "referencial não-inercial" e se faz necessário levar em conta a diferença entre a nova concepção e a concepção newtoniana e acrescentar *ad-hoc* os termos de "forças fictícias" ou "inerciais" que apareceriam naturalmente na visão newtoniana. Essa última abordagem é considerada nos livros didáticos como "mecânica Newtoniana", mas enfatizamos que foram considerações posteriores e até contraditórias à abordagem do próprio Newton. As forças fictícias podem ser compreendidas de forma similar à força de inércia, como Newton a entende, que não são forças aplicadas entre corpos mas forças inatas que surgem do movimento do corpo.

Teoria da Relatividade Especial e grandezas relativísticas

Buscando melhores explicações para a eletrodinâmica sem utilizar o éter (um meio que servia como um referencial absoluto, assim como o espaço absoluto), Albert Einstein introduz a sua Teoria da Relatividade Especial (ou Restrita) no artigo "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento" (Einstein, 2014b). Einstein começa o seu trabalho com 2 postulados: a constância da velocidade da luz e o princípio da relatividade.

O princípio da relatividade diz que, para todos os referenciais em que valem as leis da mecânica (referenciais inerciais), também valem as leis do eletromagnetismo. Uma parte desse princípio já foi analisado por Galileu Galilei e Isaac Newton (Corolário V), mas Einstein o estendeu para fenômenos eletromagnéticos como uma crítica ao espaço newtoniano.

Por meio desse postulado, foi deduzido que o espaço e o tempo não são fixos para todos os observadores. Através da mudança de velocidade relativa, o espaço se contrai e o tempo se dilata, contrariando a ideia de espaço e tempo imutáveis de Newton.

É interessante notar que Einstein e muitos livros didáticos de Relatividade Especial usam corpos materiais para medir essas mudanças (observadores, réguas e relógios), sugerindo que Einstein inicialmente não queria assumir que o espaço e o tempo mudam por si mesmos, mas sim que essas mudanças são empíricas nos corpos materiais (ver por exemplo o capítulo introdutório de (Einstein, 2003)). Dessa forma, Einstein evita mais uma característica da física de Newton: a independência metafísica do espaço e do tempo em relação ao mundo material. Veremos que essa visão muda após o desenvolvimento da sua Teoria da Relatividade Geral.

Teoria da Relatividade Geral e a inércia relativística

A Teoria da Relatividade Especial tratava somente sobre referenciais inerciais, deixando questões em aberto sobre o movimento de corpos acelerados.

Diante disso, Albert Einstein publicou uma generalização da sua teoria alguns anos depois do primeiro artigo sobre a Relatividade Especial, “Os fundamentos da teoria da relatividade geral” (Einstein, 2014a).

Para isso, ele faz o seu princípio da relatividade ser ainda mais distante da mecânica newtoniana, buscando abandonar não só a existência de repouso absoluto e de movimento absoluto a velocidade constante, mas também a existência de movimento acelerado absoluto.

A sua motivação para isso vem do princípio de Mach (conjunto de ideias do físico Ernst Mach), que possui várias formulações (Assis, 2013, p. 217), mas todas elas giram em torno da ideia de que um referencial não pode saber se está em movimento absoluto, mesmo com a presença de efeitos inerciais (presentes em movimentos não-inerciais). Voltaremos a esse princípio na seção sobre a Mecânica Relacional.

Assim, o princípio da relatividade geral é “As leis da física devem ter uma estrutura tal que a sua validade permaneça em sistemas de referência animados de qualquer movimento” (Einstein, 2014a). Essa constatação, se for verdade, não permite que um observador em um referencial não-inercial descubra que está em movimento por meio de experimentos, descartando a possibilidade de um movimento absoluto. Porém, como implementá-lo na física? Para isso, Einstein formula uma nova teoria da gravitação.

Para explicar como um corpo A observa as estrelas distantes acelerando mesmo na ausência de forças impressas sobre ela (para Newton, isso significa que A na verdade possui uma aceleração absoluta), Einstein reformula a lei da inércia, explicando que A na verdade observa um campo gravitacional surgindo em todo o universo, não sendo a gravidade uma força, mas apenas uma curvatura do espaço e do tempo (Einstein, 2014a). Assim, as estrelas distantes estariam apenas seguindo o seu movimento natural (por inércia, ou seja, na ausência de forças impressas) em um espaço-tempo curvo. Isso só é possível porque corpos em campos gravitacionais iguais são acelerados na mesma intensidade, o que leva ao próximo postulado.

O princípio da equivalência diz que um sistema onde um observador (corpo material) está com aceleração a em uma caixa com a mesma aceleração é localmente equivalente a outro sistema onde um observador está em queda livre (isto é, sem acelerações além da gravitacional) com aceleração gravitacional g se $a = g$. Portanto, esse observador não vê diferença experimental entre essas duas situações se observar corpos nas mesmas situações respectivas.

Na primeira situação, o observador veria outros corpos na caixa em repouso em relação a ele, pois todos possuem a mesma aceleração. Ou seja, seria como se todos estivessem em MRU, seguindo a lei da inércia.

Na segunda situação, o observador também veria corpos vizinhos em repouso em relação a ele, pois todos possuem aproximadamente a mesma aceleração gravitacional g em relação a um referencial inercial. É apenas aproximadamente, pois o campo gravitacional varia conforme a distância do corpo e possui componentes horizontais entre corpos distantes um do outro. Essas diferenças nas acelerações gravitacionais são chamadas de “efeitos de maré”.

Para implementar o princípio da relatividade geral, é necessário que os corpos na segunda situação também sigam a lei da inércia. Logo, a inércia deve ser modificada para não levar em consideração as acelerações provocadas pela

gravidade. Para manter a formulação da inércia inalterada, a gravidade relativística não deve ser considerada uma força impressa nos corpos.

O que é o movimento observado em campos gravitacionais então? Só é possível explicar isso sem usar forças se o próprio espaço e o tempo pelo qual o corpo de prova viaja mudar, não alterando o movimento inercial do corpo. Dessa forma, observamos a Terra orbitando o Sol porque o espaço-tempo é curvado pelo Sol dessa maneira, e a Terra está apenas seguindo a geodésica local.

Essas acelerações gravitacionais só não aparecem em um espaço-tempo plano, como é o caso da Relatividade Especial. Assim, corpos em queda livre não observam corpos vizinhos acelerando, pois a diferença no espaço-tempo entre esses corpos é infinitesimal. Por isso, o espaço-tempo é localmente (ou seja, em vizinhanças infinitesimais) plano, mas curvo entre distâncias grandes. Matematicamente, o espaço-tempo é uma variedade.

Por conta desses aspectos, Einstein não manteve a ideia de que a curva e contração do espaço e a dilatação do tempo são apenas medidos por fenômenos materiais, visto que a Relatividade Geral assume propriedades não-materiais para essas grandezas, como o tensor métrico $g_{\mu\nu}$. Por causa disso, Einstein aceitou que sua teoria geral retomou de certa forma um “éter”, por meio de um espaço cuja existência é independente do mundo material, mas cujas propriedades intrínsecas podem ser modificadas por ele.

Grandezas relacionais

A Mecânica Relacional, desenvolvida por André Koch Torres de Assis, pode ser concebida como a consequência de dois princípios: A Navalha de Ockham e o Princípio de Mach. A Navalha de Ockham é utilizada por Assis no sentido de considerar as observações empíricas de corpos materiais acima de hipóteses metafísicas. Ao invés de dizer que os movimentos dos corpos se dão em relação a algo nunca observado diretamente por experimentos, como o espaço absoluto, eles devem ser dados apenas em relação a outros corpos materiais. Nessa ótica, não há como dizer se o balde de Newton gira em relação ao espaço absoluto, mas é um fato que ele gira em relação aos corpos celestes do universo.

Além disso, entidades como o espaço absoluto e o tempo absoluto não possuem relação direta com o mundo material; já o espaço relativo e o tempo relativo são medições obtidas a partir de corpos materiais, não sendo necessário postular as suas existências. Para Ernst Mach, a física deve ser livre de “obscuridades metafísicas” (Mach, 1960, p. xxii, citado por Assis, 2013), ou seja, livre de grandezas além dos corpos materiais, como as entidades absolutas de Newton. Sobre o relacionismo do espaço e do tempo, Mach diz:

> Creio que devo adicionar, e já fiz isto em uma outra publicação, que é pelo menos supérfluo levar explicitamente em consideração o espaço e o tempo na lei da causalidade. Como só reconhecemos por certos fenômenos aquilo que chamamos de tempo e espaço, as determinações espaciais e temporais só são determinadas por meio de outros fenômenos. Se, por exemplo, expressarmos as posições dos corpos terrestres como funções do tempo, isto é, como funções do ângulo de rotação da Terra, determinamos simplesmente a dependência das posições dos corpos terrestres entre si (Mach, 1981, citado por Assis, 2013).

Para implementar o princípio de Mach, a Mecânica Relacional se baseia apenas em grandezas relacionais, ou seja, em relação a outros corpos: espaço

relativo, tempo relativo, movimento relativo, massa relativa etc. Dessa forma, as grandezas na física devem ser obtidas por meio de proporções (relações) entre corpos materiais, não tendo um valor absoluto ou existência absoluta.

Em síntese, a Mecânica Relacional busca se livrar de grandezas absolutas por meio do foco em observações de corpos materiais, que apenas podem inferir grandezas relativas (proporções entre corpos materiais).

Forças inerciais para a Mecânica Relacional

Fazendo uma conexão entre a eletrodinâmica de Weber e a gravitação, Assis propõe uma força gravitacional entre dois corpos pontuais 1 e 2 nos moldes da força elétrica de Weber (ASSIS, 2013, p. 279):

$$\vec{F} = -H_g m_1 m_2 \frac{\hat{r}_{12}}{r_{12}^2}\left[1 - \frac{\xi}{c^2}\left(\frac{\dot{r}_{12}^2}{2} - r_{12}\ddot{r}_{12}\right)\right], \tag{3}$$

onde H_g e ξ são constantes fundamentais e r_{12} a posição relativa entre os dois corpos. Esta força se reduz à força gravitacional de Newton no limite $c \to \infty$ e assumindo $\xi = 6$ consegue explicar o avanço de periélio de planetas sem recorrer à mecânica relativística. Integrando essa força para todas as partículas do universo, ele deduziu todos os termos das forças inerciais e uma igualdade entre a massa inercial e a massa gravitacional (fato sem explicação nas teorias de Newton e de Einstein).

O principal resultado da Mecânica Relacional é a implementação completa do princípio de Mach a partir da origem dessas forças de inércia nas galáxias distantes. Não há como diferenciar a rotação do balde de Newton com a rotação das galáxias, pois a força centrífuga que empurra a água para as suas bordas aparece em ambas essas situações.

O movimento dos corpos é puramente relativo, não sendo necessário postular entidades absolutas. Por causa disso, situações cinematicamente equivalentes (com os mesmos movimentos relativos) também são dinamicamente equivalentes (as mesmas forças aparecem). Essa é uma das principais formulações do princípio de Mach.

Dessa forma, a Mecânica Relacional de Assis trata a inércia como resultado de um conjunto de forças, de uma forma semelhante a Newton. A diferença é que a origem dessas forças inerciais é material (corpos celestes) e que elas surgem a partir do movimento em relação aos corpos do universo distante.

Logo, um corpo em um universo vazio não possui inércia. Filosoficamente, isso quer dizer que o balde não possui movimento absoluto, pois o seu movimento só faz sentido em relação aos outros corpos materiais. Se a água permanecesse curva mesmo após o desaparecimento dos corpos celestes, significaria que o balde ainda se move e a inércia surge dele mesmo em relação ao espaço absoluto.

Conclusão

A mecânica de Newton defende que as forças de inércia são inerentes aos corpos devido a seu movimento em relação ao espaço absoluto. Para Einstein, o movimento inercial é a geodésica que os corpos seguem na ausência de forças impressas em meio a curvas no espaço-tempo (campos gravitacionais). Na mecânica relacional, as forças de inércia são forças gravitacionais que as galáxias distantes exercem nos corpos, que dependem da aceleração relativa entre eles.

O contraste da interpretação de diferentes teorias para os mesmos resultados pode ser usado como instrumento no ensino de Física para aprimorar a compreensão dessas teorias. Igualmente, envolve o exercício da união entre ensino, história e filosofia da física para o desenvolvimento de uma visão holística da ciência enquanto prática e pensamento humano e provocar em estudantes uma visão crítica de que as teorias físicas, mesmo as desenvolvidas há séculos e muitas vezes apresentadas como bem estabelecidas e de alguma forma intocadas, ainda despertam muitos questionamentos quanto a suas implicações para a descrição e entendimento do universo.

Referências

ASSIS, André Koch Torres. **Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional**. Montreal, Quebec: Apeiron Montreal, 2013. Disponível em: https://www.ifi.unicamp.br/~assis/Mecanica-Relacional-Mach-Weber.pdf. Acesso em: 7 set. 2024.

BUSCATTI JUNIOR, Donizete Aparecido Buscatti. **O perfil epistemológico do conceito de espaço em alunos do curso de licenciatura em Física**. 2014. Dissertação de Mestrado (Educação para Ciências) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, 2014.

CHAIB, João Paulo Martins de Castro; AGUIAR, Matheus da Costa. Força de inércia: aprofundando o debate. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 142–161, 2016.

EINSTEIN, Albert. Os fundamentos da teoria da relatividade geral. *In*: TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA I. 6. ed. Coimbra: Fundação Calouste Gulbenkian, 2014a. Disponível em: https://gulbenkian.pt/publications/textos-fundamentais-da-fisica-moderna-i/. Acesso em: 7 set. 2024.

EINSTEIN, Albert. Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento. *In*: TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA I. 6. ed. Coimbra: Fundação Calouste Gulbenkian, 2014b. Disponível em: https://gulbenkian.pt/publications/textos-fundamentais-da-fisica-moderna-i/. Acesso em: 7 set. 2024.

EINSTEIN, Albert. **The meaning of relativity**. tradução: Edwin P. Adams. London: Routledge, 2003.

KOSMINSKY, Luis; GIORDAN, Marcelo. Visões sobre Ciências e sobre o Cientista entre Estudantes do Ensino Médio. **Química Nova na Escola**, v. 15, p. 11–18, 2002.

MATTHEWS, Michael R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164–214, 1995.

MONTEIRO, Midiã M.; MARTINS, André Ferrer P. História da ciência na sala de aula: Uma sequência didática sobre o conceito de inércia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4501-1-4501–9, 2015.

NEWTON, Isaac. **Principia: princípios matemáticos de filosofia natural**. São Paulo: Edusp, 2012.

SEROGLOU, Fanny; KOUMARAS, Panagiotis. The contribution of the history of physics in physics education: A review. **Science and Education**, v. 10, n. 1–2, p. 153–172, 2001.