

Modelo de corpúsculos: uma abordagem intuitiva no Ensino de Física

Cairo Henrique Vaz Cotrim¹, Daniel Ordine Vieira Lopes²

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

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

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de abordagem didática para explicação de diferentes leis e propriedades da física básica a partir de um modelo teórico no qual os corpos materiais são constituídos por corpúsculos idênticos. Utilizando esse modelo deduzimos, a partir de experimentos mentais e argumentos de lógica, proporcionalidade e simetria, a terceira lei de Newton, a lei de conservação de quantidade de movimento e leis da calorimetria. O modelo foi construído por estudante de ensino médio a partir da dificuldade observada em seus colegas na compreensão de diversos conceitos da física. O trabalho é teórico-dedutivo, utilizando formalismo lógico-matemático. Mostramos ainda que o modelo construído é similar a analogias e explicações presentes no Principia de Isaac Newton. O modelo, portanto, pode ser usado para se estimular a argumentação lógica e experimentos mentais no contexto das ciências naturais, em particular a física, recurso bastante utilizado historicamente ao longo desta ciência. As deduções foram discutidas entre estudantes de ensino médio, mas cabe a investigações futuras avaliar se sua utilização favorece ou não a apropriação dos conceitos pelos estudantes.

Palavras-chave: Corpúsculos, Leis de Newton, Experimento Mental.

Introdução

Este trabalho apresenta um modelo mental para descrição de corpos materiais e suas interações que pode auxiliar no entendimento de leis físicas, principalmente da mecânica, a partir de experimentos mentais. Este modelo pode auxiliar no ensino de física no sentido de apresentar explicações hipotético-dedutivas para os conceitos a serem apresentados, se utilizando de argumentos de simetria, proporcionalidade e causa e efeito.

As ciências naturais sempre se beneficiaram de modelos, muitas vezes bastante simplificados, para tornar os fenômenos mais inteligíveis. Podemos mencionar diversos modelos corpusculares como de Demócrito, Dalton ou Newton, usados para descrever desde a constituição da matéria até os fenômenos luminosos. Modelos, mesmo superados, podem ser usados como analogias para o ensino de ciências, como um primeiro passo para a compreensão de conceitos mais abstratos (Justi; Gilbert, 1999).

Diferentes autores defendem que ensinar física através de métodos hipotético-dedutivos, usando argumentos lógicos, hipóteses e relações causais, pode ser (é?) mais eficaz que abordagens positivistas, por caminhos hipotético-dedutivos (Stinner, 1990; Lawson, 2005; Lee; Park, 2013). Argumentam também que o “fazer ciência” parte muitas vezes de hipóteses a partir de argumentações lógicas e experimentos mentais ao invés de experimentos reais e indução.

Experimentos mentais estão presentes em toda a história da ciência moderna, e até mesmo anterior a essa, não apenas como formas de imaginar a montagem e resultado de experimentos antes desses serem efetivamente realizados, mas também imaginando experimentos que são impossíveis. No primeiro caso podemos citar a queda dos objetos da torre de Pisa, de Galileu, e no último caso o experimento de Newton de rotacionar o universo ao redor de um balde com água, ou o de Einstein de se viajar acompanhando um feixe de luz. Stinner (1990) argumenta que experimentos mentais estão no ápice do pensamento científico e assim defende que o ensino de ciências deve incentivar o pensamento imaginativo através de experimentos mentais. Guimarães (2021) aponta que a utilização de experimentos mentais em sala de aula pode se mostrar “uma metodologia eficaz para o desenvolvimento de um aprendizado eficiente e significativo em ciências, promovendo nos estudantes capacidades como pensamento crítico e autonomia intelectual”.

No contexto da aprendizagem significativa de Ausubel (Pelizzari *et al.*, 2002), a abordagem aqui apresentada pode se basear em subsunçores na cognição dos estudantes, oriundos de observações mais simples e cotidianas sobre o movimento de corpos e sobre relações de causa e efeito, para construir de maneira lógica, a partir desses, novos conceitos e leis físicas.

Pensando ainda que diferentes estudantes possuem mais ou menos facilidade com conceitos abstratos, ou mais e menos necessidade de metáforas ou simplificações, esta pode ser uma proposta com a capacidade de adicionar à gama de recursos disponíveis aos professores.

Metodologia

O modelo aqui descrito foi construído por estudante de ensino médio, o principal autor deste trabalho, orientado por seu professor de Física, o segundo autor, como parte de um projeto de Iniciação Científica de Ensino Médio (PIBIC-EM). O objetivo principal do projeto PIBIC consistia em investigações em história e epistemologia da ciência. No entanto, as leituras dos textos originais (traduzidos) de Newton (2012) estimularam a reflexão sobre outras formas de apresentar conteúdos usuais de física do Ensino Médio.

A metodologia desenvolvida neste trabalho é, portanto, de modelagem teórica e abordagem dedutiva, utilizando formalismo lógico-matemático, complementada por pesquisa bibliográfica principalmente sobre os trabalhos de Isaac Newton (2012). Conforme será apresentado neste texto, Newton utiliza modelo similar para as explicações que propõe, então de certa forma podemos entender o nosso trabalho como um detalhamento e aplicação em outros contextos da abordagem de Newton.

Esta reflexão foi motivada também pela observação do principal autor das dificuldades de boa parte de seus colegas com a compreensão de conceitos basilares da mecânica Newtoniana. Quando, ao longo deste texto, argumentamos que algo pode ser mais intuitivo para estudantes, estamos partindo da perspectiva do próprio autor estudante de Ensino Médio e seus colegas, a partir de discussões em sala de aula e estudos em coletivo. Não foram realizados ainda testes ou aplicações do modelo de forma controlada, para corroborar as hipóteses de eficácia das propostas aqui apresentadas.

Modelo dos corpúsculos

Nos experimentos mentais propostos neste artigo, os corpos serão sempre visualizados como uma porção de corpúsculos. A motivação para visualizar os corpos

em movimento como aglomerados de partes menores é simples: reducionismo. Para evitar que os estudantes de física sejam apresentados às leis da mecânica a partir de definições puramente matemáticas e abstratas, buscamos utilizar alguma forma mais intuitiva de visualizar os corpos. A forma que encontramos é reduzir esses corpos em partes menores e analisar como o comportamento microscópico de cada uma das partes resulta no comportamento macroscópico.

Para formalizar a ideia das “partes” de um corpo, é possível utilizar o conceito de “corpúsculo”, que será aqui uma designação genérica dada a um corpo cujas dimensões são irrelevantes para a análise do sistema. De certa forma, pode ser um sinônimo de “ponto material”, mas, para fins didáticos, vamos considerar que os corpúsculos possuem dimensão esférica para que os alunos não precisem abstrair a ideia de um corpo sem volume. Ainda assim, as dimensões dos corpúsculos não vão interferir nos resultados dos experimentos mentais.

Além do tamanho desprezível, outra propriedade dos corpúsculos deste modelo é que corpúsculos de mesmo tipo são idênticos, não há diferença intrínseca entre um e outro, bastando apenas diferenciá-los pelas suas posições no espaço. Assim, vamos considerar nos nossos experimentos mentais que todo corpo pode ser dividido em um ou mais corpúsculos de mesma massa m .

Diante desses aspectos, uma mudança imprimida sobre um corpo é transmitida igualmente entre seus corpúsculos. Ou seja, se os corpúsculos de um determinado corpo possuem uma propriedade (grandeza física) extensiva em comum, podemos dizer que a propriedade do corpo extenso formado por eles é proporcional ao número de corpúsculos. Essa proporcionalidade também se aplica à massa, já que todos os corpúsculos possuem massas iguais.

Há também as chamadas propriedades intensivas dos corpos, que são específicas para os corpúsculos do corpo e, conseqüentemente, não dependem do número deles. Alguns exemplos de propriedades intensivas são temperatura, densidade, velocidade e calor específico.

Em síntese, esse modelo busca diminuir a abstração de fenômenos físicos ao simplificar os corpos em partes menores que formam o todo. É útil, portanto, para a criação de uma mentalidade de um pesquisador; o estudante conseguirá entender teorias físicas mais difíceis, porque buscará simplificá-la em partes mais simples para entendê-las por completo. Esta divisão de corpo em partes menores e utilização de relações lógicas e de causa e efeito é similar em alguns aspectos ao que é feito por Newton em seu Principia (2012), como será apontado adiante.

Terceira Lei de Newton

No Livro I do Principia (Newton, 2012), Newton parte de três leis do movimento (axiomas) para deduzir outras leis. Entretanto, ele apenas apresenta essas leis, não dando muita ênfase em uma explicação intuitiva para elas. Nesta seção, discutimos uma forma didática de fundamentar a terceira lei de Newton. Esta lei diz que a força F_{AB} que um corpo A exerce em B é igual e oposta à força F_{BA} que B exerce em A . Na notação atual, isso pode ser escrito como

$$F_{AB} = -F_{BA} \quad (1)$$

Pode-se deduzir esta lei por meio de simetria. Considerando a interação entre dois corpúsculos de diferentes corpos, é fácil perceber que é uma situação simétrica,

pois todos os corpúsculos são idênticos entre si. Isto é, o módulo da força que um corpúsculo A exerce em outro B é a mesma que B exerce em A . Caso contrário, não faria sentido as forças serem diferentes, pois os corpúsculos são idênticos entre si e, portanto, as forças que imprimem devem ser as mesmas.

Ademais, as duas forças são vetores opostos para manter a simetria. Imagine um corpúsculo A à esquerda exercendo uma força atrativa em B (que está à direita de A) para a esquerda, por exemplo. Observando os corpúsculos do outro lado, de tal forma que A esteja à direita e B à esquerda, percebe-se que as situações são idênticas. Portanto, como A e B são indiferenciáveis entre os dois pontos de vista, B deve exercer uma força atrativa em A de mesmo módulo e sentido oposto.

Adentrando em corpos macroscópicos, considere que um corpo A com m corpúsculos e outro corpo B com n corpúsculos estão interagindo por meio de forças internas do sistema. Sendo F a força entre dois corpúsculos, percebe-se que cada corpúsculo de A sofrerá n forças. Considerando que as dimensões espaciais dos corpos são desprezíveis em relação às distâncias entre eles, todas essas n forças terão o mesmo sentido e os seus módulos podem ser somados. Assim, cada corpúsculo de A sofrerá uma força igual a $n \cdot F$. Como A possui m corpúsculos, a força resultante de B em A é igual a

$$F_{BA} = m \cdot n \cdot F. \quad (2)$$

Similarmente, cada corpúsculo do corpo B sofre uma força $m \cdot (-F)$, conforme a Terceira Lei de Newton para corpúsculos deduzida anteriormente. Logo, como B possui n corpúsculos, a força resultante de A em B é igual a

$$F_{AB} = -m \cdot n \cdot F.$$

Novamente, fica constatado que $F_{AB} = -F_{BA}$, conforme a equação (1).

Conservação do momento linear

A lei da conservação do momento linear pode ser deduzida a partir da terceira lei. Seguindo essa dedução, Newton utilizou um método de experimento mental parecido com o nosso modelo de corpúsculos, visualizando os corpos como aglomerados de “partes”. No Corolário III do Livro I, ele escreve:

A quantidade de movimento, que é obtida tomando-se a soma dos movimentos dirigidos para as mesmas partes, e a diferença daqueles que são dirigidos a partes contrárias, não sofre mudança a partir da ação de corpos entre si.

Pois a ação e sua reação oposta são iguais, pela terceira Lei, e portanto, pela segunda Lei, elas produzem nos movimentos mudanças iguais em direção a partes opostas. Portanto, se os movimentos são dirigidos para as mesmas partes, seja o que for que se acrescente ao movimento do corpo precedente será subtraído do movimento daquele que segue, de modo que a soma será a mesma que antes. Se os corpos se encontram, com movimentos contrários, haverá uma igual dedução a partir dos movimentos de ambos e, portanto, a diferença dos movimentos dirigidos a partes opostas permanecerá a mesma (Newton, 1990, p. 57-58).

Lei da Gravitação Universal

O modelo de corpúsculos também pode ser utilizado para explicar como a força gravitacional de Newton segue a sua terceira lei do movimento. Isto é, se um corpo

massivo A exerce uma força gravitacional em outro corpo massivo B , B exerce a mesma força em A com o mesmo módulo no sentido oposto, validando a equação (1).

Para isso, deve-se começar explicando a proporcionalidade da força gravitacional com as massas gravitacionais. Se um corpo A possui massa M e um corpo B possui massa m , vale a relação para ambas as forças:

$$F \propto M,$$

$$F \propto m.$$

Para explicar por que há proporcionalidade entre as duas massas nas duas forças, é útil desenhar um exemplo com 2 corpos: um com 2 corpúsculos (massa $M = 2m$) e outro com 1 corpúsculo (massa m). Considere neste exemplo que uma força entre dois corpúsculos de massa m é igual a F . Assim, a força atuando no corpo m será $2F$, porque há $2m$ atuando nele. A força atuando no corpo $2m$ será $2F$ também, pois há uma força única F atuando em um corpúsculo e outra força F atuando em outro corpúsculo; somando as duas, resulta na força $2F$. Perceba que, multiplicando as massas por um valor k , a força passa a ser k^2 vezes maior. Assim, seguindo a lógica deste exemplo, a gravitação de Newton segue a sua terceira lei.

A maior dificuldade de entender a proporcionalidade das massas está na proporcionalidade da massa do corpo de prova. É fácil para um aluno perceber que a massa m é atraída duas vezes mais por uma massa $2m$ do que por outra massa m . Porém, é mais difícil entender que a massa $2m$ será atraída pela mesma força, e que esta força impressa nela cairia pela metade se a massa $2m$ fosse na verdade m . Diante disso, basta explicar que cada número de corpúsculos da massa de teste está sendo atraído por uma força igual. Somando todas as forças atuantes neste corpúsculo, temos a força gravitacional total na massa teste. Dessa forma, fica mais fácil visualizar a proporcionalidade entre a força e a massa de teste.

Isaac Newton escreveu vários argumentos sobre a proporcionalidade das massas em sua lei de força gravitacional. Convidamos o professor a ler estes escritos e a tentar simplificá-los para uma linguagem mais atual e intuitiva, com o objetivo de explicar esses argumentos em sala de aula.

Na Proposição 7 do Livro III, Newton escreveu uma dedução do fato de que a força gravitacional é proporcional às massas de dois corpos interagentes (nas palavras dele, proporcional às várias quantidades de matéria):

Que há um poder da gravidade pertencente a todos os corpos, proporcional às várias quantidades de matéria que eles contêm.

Provamos antes que todos os planetas gravitam em direção uns aos outros, assim como que a força da gravidade em direção a cada um deles, considerado separadamente, é inversamente como o quadrado das distâncias dos lugares aos centros do planeta. E, portanto, (pela Proposição 69, Livro I, e seus Corolários) segue-se que a gravidade tendendo em direção a todos os planetas é proporcional à matéria que eles contêm.

Além disto, como todas as partes de qualquer planeta A gravitam em direção a qualquer outro planeta B , e a gravidade de toda parte está para a gravidade do todo assim como a matéria da parte está para a matéria do todo, e (pela Lei III) para cada ação corresponde uma reação igual, o planeta B , por sua parte, irá gravitar em direção a todas as partes do planeta A , e sua gravidade em direção a qualquer uma das partes estará para a gravidade em direção ao todo assim como a matéria da parte está para a matéria do todo. Q.E.D (Newton, 2008, p. 203-204).

Nessa passagem, está claro a influência da Terceira Lei de Newton na formulação da sua lei de força gravitacional. Porém, na Seção 20 do Sistema do Mundo, essa relação fica ainda mais clara:

Uma vez que a ação da força centrípeta sobre os corpos atraídos é, a distâncias iguais, proporcional às quantidades de matéria nesses corpos, a razão requer que ela também seja proporcional à quantidade de matéria no corpo atraente. Pois toda ação é mútua e (pela terceira Lei do Movimento) faz com que os corpos aproximem-se um do outro e, portanto, deve ser a mesma em ambos os corpos. É verdade que podemos considerar um corpo como atraente e outro como atraído, mas esta distinção é mais matemática do que natural. A atração reside, de fato, em cada corpo na direção do outro, sendo, portanto, do mesmo tipo em ambos (Newton, 2008, p. 354).

Após o professor explicar a proporcionalidade das massas para os alunos, é necessário explicar a proporcionalidade inversa com o quadrado da distância entre os baricentros (a partir da Terceira Lei de Kepler ou comparando as diferenças entre acelerações de diferentes corpos orbitantes, de preferência) e, finalmente, introduzir a constante universal da gravitação G e a fórmula completa da força gravitacional (Tipler; Mosca, 2006, p. 377):

$$F = G \frac{Mm}{d^2}.$$

Com essa fórmula, é trivial perceber que F terá o mesmo módulo para a massa M e para massa m , pois o produto $M \cdot m$ sempre é o mesmo. Assim, torna-se intuitivo o fato de que a força gravitacional segue a lei da ação e reação de Newton.

Também pode ser útil ilustrar o motivo da força gravitacional sempre apontar para os baricentros dos corpos em interação. Para isso, pode-se começar mostrando o motivo da força gravitacional apontar sempre no centro de massa entre dois corpúsculos e depois generalizar para todos os corpúsculos.

Como a Lei de Coulomb para a força eletrostática segue um formato parecido com a da força gravitacional, é possível aplicar o mesmo experimento mental para deduzir o fato de que a força eletrostática F entre duas cargas Q e q é proporcional ao produto das suas cargas elétricas.

Calorimetria

Saindo do campo da mecânica, o modelo de corpúsculos também pode ser útil para o entendimento de outros fenômenos físicos, como o calor específico. Sem mudança de fase, um corpo de massa m e calor específico c tendo a sua temperatura variada por ΔT perderá ou receberá uma quantidade de calor Q dada por (Tipler; Mosca, 2006, p. 602)

$$Q = m c \Delta T.$$

Pode-se utilizar o modelo corpuscular da matéria para explicar o motivo do calor ser proporcional à massa do corpo. A lógica por trás disso é que um corpo de massa $k \cdot m$ possui k vezes mais corpúsculos do que um corpo de massa m e, portanto, precisa de k vezes mais energia para mudar a sua temperatura pelo mesmo valor.

A ideia está no fato de que todos os corpúsculos são idênticos, então cada um deles precisa da mesma quantidade de calor para atingir uma certa temperatura. Assim, dois corpúsculos precisam de duas vezes mais calor do que um corpúsculo, por exemplo.

Claramente, esta mesma lógica se aplica ao calor latente. Considerando um corpo com calor latente L prestes a mudar de fase (no instante em que atinge o ponto de fusão, ebulição ou sublimação), o calor necessário para mudar a fase de uma porção de massa m desse corpo é (Tipler; Mosca, 2006, p. 603)

$$Q = m L.$$

A equação acima também revela uma proporcionalidade entre calor e massa. Quanto mais corpúsculos, mais massa e, conseqüentemente, mais calor necessário.

Essas demonstrações poderiam ser feitas utilizando as fórmulas do calor específico molar e do calor latente molar. Se esse for o caso, a demonstração é mais rápida, porque utiliza-se diretamente o número de corpúsculos do corpo, sem adentrar na proporcionalidade entre massa e número de corpúsculos.

Ademais, os corpúsculos no contexto da termologia são como as moléculas de um gás monoatômico ideal, pois todas as suas moléculas são idênticas e os seus tamanhos e formatos são geralmente desprezíveis. Entretanto, deve-se atentar ao fato de que um corpo composto por moléculas diferentes terá massas diferentes em cada molécula, então átomos e corpúsculos se diferem nesse sentido. Porém, se a massa de A for k vezes maior que a de B, pode-se considerar que A possui k vezes mais corpúsculos, mantendo a correspondência entre o modelo de gás ideal e o modelo de corpúsculos.

Conclusão

O modelo aqui apresentado pode ser utilizado como recurso didático no ensino de física. Mostramos que por meio de argumentações simples, é possível construir uma linha de raciocínio clara para o funcionamento de diversas leis e conceitos físicos. Essas explicações se dão por meio da imaginação de situações de interações entre os corpúsculos dos corpos. O modelo sempre segue as mesmas regras:

- Todos os corpos são compostos de corpúsculos;
- Cada corpúsculo é idêntico ao outro, e as suas propriedades intrínsecas são sempre iguais: massa, carga elétrica, volume, calor específico etc.;
- As mudanças aplicadas a um corpo tendem a ser divididas igualmente entre os seus corpúsculos, como deslocamento, velocidade, força etc.;
- O volume e o formato dos corpúsculos são desprezíveis, não fazem diferença no sistema.

No geral, esse modelo é útil quando deseja-se explicar uma grandeza física que é proporcional à massa ou ao número de partículas. Pois, dessa forma, pode-se analisar como a propriedade de um corpo é dividida igualmente entre os seus corpúsculos, evidenciando a proporcionalidade entre a grandeza física em questão e o número de corpúsculos do corpo (ou a sua massa).

Como visto nas seções anteriores, outros exemplos de experimentos mentais assim são os utilizados por Isaac Newton em seus livros. Newton usualmente visualiza o movimento dos corpos por análises de como as suas “partes” interagem entre si. Por meio dessa ferramenta, ele conseguiu deduzir diversas leis sem o auxílio das formulações algébricas das grandezas físicas. Assim, pode-se dizer que o modelo de corpúsculos deste artigo é como uma formalização contemporânea ou uma revisitação do modo de pensar de Newton.

Convidamos professores da física a proporem tais experimentos mentais em sala de aula, pois podem se mostrar muito frutíferos para a apropriação dos conceitos pelos alunos. É preferível que as explicações utilizando o modelo aqui apresentado mantenham a sua fórmula lógica, construindo uma linha de raciocínio partindo dos fenômenos das partes (microscópicos) até o todo (macroscópico). A comunicação das ideias do professor pode ser facilitada por meio de ilustrações no quadro, perguntas durante o experimento mental, animações, exemplos empíricos etc.

Ademais, é importante pensar em novas explicações, além das que já foram apresentadas neste texto. Por exemplo, talvez seja possível criar experimentos mentais que expliquem a conservação da energia cinética em colisões elásticas e a relação da elasticidade dos corpos com as velocidades relativas antes e após a colisão. Pressão e força de atrito, já que lidam com superfícies interagentes compostas por corpúsculos, são outras sugestões. Além de fenômenos da mecânica, outros experimentos mentais também podem ser pensados nas áreas de termologia e eletricidade. Outro exemplo, na termologia, seria tentar explicar a Lei dos Gases Ideais por meio de interações com os corpúsculos de um gás.

Referências

GUIMARÃES, Ricardo Rangel. Epistemologia dos experimentos mentais, argumentação e explicações científicas no ensino de Física e de Ciências. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 4, n. 3, 2021. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/rbecm/article/view/12909>. Acesso em: 10 nov. 2024.

JUSTI, Rosária; GILBERT, John K. History and Philosophy of Science through Models: The Case of Chemical Kinetics. **Science Education**, v. 8, n. 3, p. 287–307, 1999.

LAWSON, Anton E. What is the role of induction and deduction in reasoning and scientific inquiry?. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 42, n. 6, p. 716–740, 2005.

LEE, Han Su; PARK, Jongwon. Deductive reasoning to teach Newton's Law of Motion. **International Journal of Science and Mathematics Education**, v. 11, n. 6, p. 1391–1414, 2013.

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

PELIZZARI, Adriana *et al.* Teoria da Aprendizagem Significativa segundo Ausubel. **Revista PEC**, v. 2, n. 1, p. 37, 2002.

STINNER, Arthur. Philosophy, thought experiments and large context problems in the secondary school physics course. **International Journal of Science Education**, v. 12, n. 3, p. 244–257, 1990.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física Para Cientistas e Engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 2006.