

A BUSCA POR UMA TEORIA DE TUDO: UMA PROPOSTA DE UNIDADE DIDÁTICA

The search for a theory of everything: a didactic unit proposal

Julio Francisco dos Santos Sousa[juliofsousa93@gmail.com]

Thatyusce Bonfim Gomes [thaty.bonfim@gmail.com]

Vanessa Carvalho de Andrade [vcandrade@unb.br]

Instituto de Física, Polo 1 MNPEF, Universidade de Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro, ICC Centro, BT 297, Brasília - DF

Recebido em: 08/09/2023

Aceito em: 28/11/2023

Resumo

Frente à importância da utilização da história da ciência para a formação dos alunos da educação básica, o presente artigo propõe uma unidade didática para apresentar a Teoria de Tudo através de uma abordagem histórica. Foi elaborado um texto-resumo para auxiliar professores e estudantes em suas aulas de Física Contemporânea. Além de passar pelas principais unificações da história, o texto aborda o desenvolvimento da teoria da relatividade e da Mecânica Quântica e, também, o problema da incompatibilidade entre essas duas teorias. Faz-se uma apresentação, ainda que rápida, sobre o modelo padrão das partículas elementares, e como esse modelo pode vir a se tornar a Teoria de Tudo através do desenvolvimento da teoria das cordas. Uma unidade didática é desenvolvida em sala de aula e há, por fim, há uma análise das respostas dos alunos a um questionário disponibilizado ao término da unidade didática proposta.

Palavras-chave: História da Ciência, Ensino de Física Contemporânea, Teoria das Cordas e Teoria de Tudo.

Abstract

Given the importance of using the history of science for the development of students in basic education, this article proposes a didactic unit to present the theory of everything through a historical approach. In addition, the text provides a historical overview of the search for this theory. Besides going through the main unifications of history, the text addresses the development of the theory of relativity and quantum mechanics, and also the problem of the incompatibility between these two theories. A brief overview is made of the standard model of elementary particles, and how this model might become the theory of everything through the development of string theory. A didactic unit is developed in the classroom and, finally, there is an analysis of the students' responses to a questionnaire made available at the end of the proposed didactic unit.

Keywords: History of Science, Teaching Contemporary Physics, String Theory and Theory of Everything.

1. Introdução

A Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB) determina que o ensino médio deve proporcionar “o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico” (LDB, Art 35). A fim de cumprir esse propósito e proporcionar uma formação cidadã, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), documento norteador da educação básica brasileira, determina que os alunos devem ser capazes de “compreender as Ciências da Natureza como empreendimento humano, e o conhecimento científico como provisório, cultural e histórico” (Brasil, p. 324, 2018). Ainda de acordo com a BNCC, “a contextualização social, histórica e cultural da ciência e da tecnologia é fundamental para que elas sejam compreendidas como empreendimentos humanos e sociais” (Brasil, 2018, p. 549). Sendo assim, a utilização de abordagens históricas no ensino básico é de precípua importância.

Muitos alunos trazem consigo a ideia de que a ciência é composta de conhecimentos absolutos, obtidos através de um método irrevogável e que os cientistas são grandes gênios que desvelam esses conhecimentos para a sociedade. Ademais, também existem aqueles que possuem posturas negacionistas e anti-científicas, que acreditam que a ciência é composta da opinião daqueles que a constroem (Silva, 2006). Desta forma, é fundamental que o professor atue para desmistificar essas ideias. O uso de abordagens históricas possibilita que os alunos construam uma visão mais adequada da ciência e do fazer científico, uma vez que possibilita que os alunos tenham contato com os aspectos internos e externos à ciência. Ao acompanhar o desenvolvimento de um conhecimento científico, espera-se que o aluno seja capaz de perceber os fatores que influenciam esse processo e, assim, compreender a ciência como uma construção humana, social e passível de mudanças. Além disso, a utilização de abordagens históricas permite que os alunos compreendam a relação entre a ciência, a tecnologia e a sociedade (Silva, 2006).

Apesar de sua grande importância, as abordagens históricas não são muito utilizadas nas salas de aula brasileiras. Um dos principais motivos para essa escassez é a falta de materiais didáticos de qualidade, que sejam adequados para a educação básica. Outro fator que também é apontado como limitação para a abordagem é a falta de preparo dos professores para lidar com esse tipo de metodologia (Martins, 2007).

Considera-se, ainda, os desafios em trazer esses temas contemporâneos de Física à sala de aula, que ocorrem devido à complexidade dos conceitos envolvidos, à falta de recursos didáticos adequados ou à falta de tempo para cobrir tópicos adicionais em um programa de ensino já sobrecarregado. É preciso reconhecer ainda a falta de domínio dos temas da física contemporânea e de fronteira pelos professores, que passa pela questão da formação continuada (Moreira, 2017; Ostermann & Moreira, 2020).

Frente ao exposto, esse artigo apresenta uma proposta de unidade didática que aborda a Teoria de Tudo sob uma perspectiva histórica. É uma pesquisa que surgiu no contexto da disciplina *Física Contemporânea* do Mestrado Nacional Profissional e Ensino de Física vinculado à Sociedade Brasileira de Física (MNPEF/SBF), tendo sido levada a duas escolas por seus professores, alunos da disciplina e autores deste trabalho. O artigo organiza-se da seguinte forma: a próxima seção apresenta um texto norteador em formato de apanhado histórico a respeito dos episódios que permearam a busca por uma teoria unificadora¹, utilizado pelos professores autores na aplicação desta unidade didática em sala de aula e que pode auxiliar aqueles que por ventura queiram aplicar essa proposta de modo integral ou adaptado. As demais seções apresentam o desenho da unidade didática e sua aplicação em

¹ O texto foi escrito com o propósito de ser um texto norteador que possa ser utilizado tanto pelo professor, quanto pelos alunos.

sala de aula, com a realização de algumas análises com respeito ao questionário disponibilizado e discussão dos principais resultados.

1. A Teoria de Tudo: um apanhado histórico

A presente texto visa passear pelas unificações da história, abordar o desenvolvimento da teoria da Relatividade e da Mecânica Quântica e, também, o problema da incompatibilidade entre essas duas teorias. Faz-se uma apresentação, ainda que rápida, sobre o Modelo Padrão das Partículas Elementares e como esse modelo pode vir a se tornar a Teoria de Tudo, através do desenvolvimento da Teoria das Cordas. Trata-se de uma narrativa histórica e com elementos conceituais sobre as teorias físicas apresentadas.

2.1 Unificações

A busca por uma teoria que possa explicar todos os fenômenos de uma só vez move a ciência desde o seu nascimento. De certa forma, o desejo de unificar fenômenos da natureza sempre fez parte do espírito científico. Uma das primeiras unificações ocorreu no século XVI, quando William Gilbert (1544-1603), no ano de 1600, publicou o livro *De Magnete*. Neste material, Gilbert mostrou que os efeitos magnéticos da Terra eram da mesma natureza dos efeitos magnéticos observados nas magnetitas, os ímãs naturais (WHITTAKER, 1951). Anos depois, em 1687, outra grande unificação veio com o trabalho de Isaac Newton (1642-1726) sobre astronomia, o *Principia III*. Para ele, a mesma força que faz com que os corpos caiam em direção a Terra também faz com que os astros se mantenham em órbita.

No século seguinte, em 1752, o experimento da guarita, idealizado por Benjamin Franklin (1706-1790) e realizado por T. F. D'Alibard (1709-1778), apresentou evidências favoráveis a uma unificação já esperada por aqueles que estudavam os fenômenos elétricos: a eletricidade presente nas nuvens de tempestades é da mesma natureza que a eletricidade produzida em laboratório (MOURA, 2019).

Anos mais tarde, em 1820, Hans Christian Ørsted (1777-1851) iniciou o movimento de união da eletricidade ao magnetismo. Ørsted identificou que a presença de corrente elétrica em um fio perturba o funcionamento de bússola próxima a ele. A partir dessa descoberta, vários outros cientistas se dedicaram ao estudo do eletromagnetismo, isto é, se dedicaram ao estudo da relação existente entre a eletricidade e o magnetismo (MARTINS, 1986). Essa unificação foi solidificada e ampliada pela teoria eletromagnética de James Clerk Maxwell (1831-1879) que, além de estabelecer de vez a união entre a eletricidade e o magnetismo, também incorporou a óptica a esses fenômenos ao teorizar a luz como uma onda eletromagnética (WHITTAKER, 1951). Desta forma, a teoria do eletromagnetismo parecia uma boa candidata para a teoria que pudesse explicar todos os fenômenos.

No fim do século XIX o clima era de otimismo, achava-se que os mistérios da natureza estavam chegando ao fim. William Thomson (1824-1907), mais conhecido como Lorde Kelvin, chegou a dizer que a física era um céu limpo com apenas duas nuvens, dois pequenos problemas que precisavam ser resolvidos para que se entendesse a natureza em sua completude: era necessário provar a existência do éter e descrever a curva espectral da radiação térmica (PEEBLES, 2002). O que Kelvin não esperava é que essas duas pequenas nuvens representavam o anúncio de uma grande tempestade: a busca pela detecção do éter resultou em uma mudança radical da ideia que se tinha sobre o tempo, o espaço e a gravidade, e a busca pela descrição da curva espectral resultou em uma mudança radical da ideia que se tinha da matéria e do mundo subatômico. Para resolver as duas pequenas nuvens de Kelvin, foi necessário construir dois novos ramos da Física que, por sua vez, mostraram que ainda existiam inúmeros segredos da natureza a serem descobertos.

2.2 Relatividade especial e Geral

Em 1905, Albert Einstein (1879-1955) publicou um artigo, intitulado “Sobre a Eletrodinâmica de Corpos em Movimento”, que apresentava os postulados sobre sua inquietude com o movimento

relativo de corpos e a luz, deixando em xeque duas áreas clássicas da Física: o eletromagnetismo e a teoria ondulatória da luz de Maxwell versus a relatividade galileana, os referenciais inerciais e os postulados de Newton sobre o movimento.

O pensamento consolidado demonstrava que as leis do movimento eram coerentes para todos os referenciais inerciais (em repouso ou em velocidade constante), como uma pessoa que joga uma bolinha para o alto e a recebe de volta na sua mão, seja essa pessoa parada em uma praça, ou em movimento dentro de um ônibus com velocidade constante. Ainda nesse caso, ambos os exemplos (parado na praça e no ônibus em movimento uniforme) estão em movimento de rotação na Terra para um referencial fixo fora do planeta. As leis da mecânica eram, portanto, as mesmas, subtraídas as situações não-inerciais.

O que intrigava Einstein em seus estudos era que esse resultado não se estendia para o movimento das cargas elétricas, seus referenciais e as leis do eletromagnetismo. Um observador em repouso, vendo uma carga elétrica em repouso, não percebe um campo magnético gerado por essa carga, pois apenas cargas em movimento criam campos magnéticos. Porém, se um segundo observador com velocidade constante percebe a mesma carga elétrica, ele a vê em movimento também com a mesma velocidade, em sentido oposto, e, nesse caso, percebe nas proximidades dessa carga um campo magnético (pois a carga em movimento cria esse campo magnético). Einstein se perguntava como havia duas físicas que explicavam o mesmo experimento mental, apenas se mudasse o ponto de vista. Ou a eletrodinâmica estava errada e precisava ser ajustada, ou a mecânica estava errada e precisava do mesmo fim. Einstein escolheu acreditar em Maxwell (Peruzzo, Pottker & Prado, 2013).

A unificação dos saberes da mecânica e do eletromagnetismo se deu com o que chamamos hoje de Teoria da Relatividade Especial (TRE), em que Einstein propôs equações (baseadas nas teorias já propostas por Lorentz e Poincaré) que traduzem os movimentos relativos tomando como constante um elemento primordial da teoria eletromagnética: a luz. Einstein desconsiderava a necessidade da presença de um éter como meio de propagação das ondas eletromagnéticas (a luz incluída aqui) e propôs que a velocidade da luz seria a mesma em qualquer referencial, seja ele em repouso ou em movimento, baseados também na sua interpretação dos resultados das experiências de Michelson e Morley.

Considerando então a velocidade da luz como sendo constante, os fenômenos de contração do espaço e dilatação do tempo seriam percebidos para diferentes referenciais, principalmente e com mais clareza para movimentos com velocidades próximas à da luz. Porém, esse resultado se tornava complicado para explicar quando era analisado um espaço contínuo tridimensional absoluto. Para tanto, Einstein formulou a TRE com base nas formulações geométricas de um espaço quadridimensional, que inserisse o tempo como uma quarta dimensão, baseado nos estudos de Hermann Minkowski (1864-1909). Para Minkowski, tempo e espaço estavam unidos de modo indissociável, formando uma espécie de malha contínua espaço-temporal, e nessa perspectiva a unificação entre os conceitos de espaço e tempo estava também consolidada na teoria de Einstein.

O que faltava agregar em todo esse contexto de Relatividade Especial era uma teoria de gravitação consistente com os primeiros resultados. A lei da gravitação newtoniana não se encaixava nos postulados propostos por Einstein em 1905 e, portanto, deveria ser agregada de alguma forma, o que rendeu a Einstein mais alguns anos de estudos. A Teoria da Relatividade Geral (TRG) propôs a incorporação da gravidade em termos da TRE e do espaço quadridimensional, revolucionando o conceito de gravidade, não mais o tratando como uma força, mas como uma deformação da geometria do espaço-tempo.

Einstein se baseou na geometria não-euclidiana de George Riemann (1826-1866) que tratava de espaços curvos. Para Einstein, o espaço-tempo só poderia ser plano na ausência de matéria, como uma malha bem esticada. No caso de presença de massa, o espaço-tempo se curvava e objetos que seguissem uma linha reta por inércia acabariam seguindo uma curva em torno de um objeto mais

massivo. Foi proposto então que a massa causaria essa deformação, atraindo corpos ou os colocando em órbita, o que Einstein traduziu como sendo a própria gravidade.

Após anos de estudo e a aplicação de uma matemática robusta, foi proposta uma modificação nos termos da Teoria da Gravitação de Newton, explicando inclusive problemas astronômicos como o avanço do periélio de Mercúrio e o desvio da luz nas proximidades do Sol. Este último resultado tendo ficado muito famoso quando foi observado em duas expedições para visualização do eclipse solar de 1919, uma na Ilha do Príncipe na costa ocidental africana e outra em Sobral, no Ceará, no nordeste brasileiro.

Finalmente, a teoria eletromagnética de Maxwell, já incorporada às leis da ótica com a descoberta das ondas eletromagnéticas, também foi incorporada às leis da mecânica quando Einstein reformulou a relatividade galileana e trouxe o espaço-tempo e a gravidade em uma só teoria de campos contínuos. O sonho de Einstein de descoberta dos fenômenos do Universo por uma teoria unificada da Física se encontrava muito próxima. Porém, teorias do mundo microscópico se desenvolviam em paralelo às descobertas do tecido contínuo de Einstein, o que o deixava cético por não acreditar em um universo baseado em leis probabilísticas. No entanto, cada vez mais os experimentos se alinhavam a uma física discreta e quântica.

2.3 Mecânica Quântica

O século XIX estava no fim e não se tinha uma expressão consolidada para a absorção de radiação do corpo negro e o comprimento de onda dessa radiação. Esse corpo negro é um corpo ideal, que absorve toda a radiação nele incidente. Uma outra forma de pensar esse problema do corpo negro, seria pensar que seria uma cavidade isotérmica com uma pequena abertura na qual a radiação poderia entrar. Essa radiação faria vibrar as paredes internas dessa cavidade, absorvendo energia e, conseqüentemente, emitindo radiação e aumentando a temperatura.

Em 1900, Max Planck (1858-1947) encontrou uma teoria que concordasse com as experimentações e evidências, supondo que os átomos da parede da cavidade do corpo negro só vibravam com valores discretos de energia. Ele próprio estava cético quanto a sua proposta, mas acreditava que era uma teoria razoável para descrever os dados experimentais. O próprio Einstein utilizou dos resultados de Planck para explicar o efeito fotoelétrico, em 1905, extrapolando a ideia da vibração dos átomos da cavidade do corpo negro à energia luminosa emitida e absorvida em valores discretos, revelando partículas sem massa dotadas de energia denominadas fótons, evidenciada quando uma radiação arrancava elétrons ao incidir em uma chapa metálica.

O espectro de emissão ou absorção de radiação dos elementos químicos foi uma primeira evidência dos resultados de Planck. Quando submetidos a uma fonte externa de energia (uma chama de vela, por exemplo), cada elemento químico emite uma série de linhas de várias cores em um espectro, sendo essas linhas específicas para cada elemento químico. Essas emissões seriam posteriormente associadas a elétrons que mudavam de órbitas elétricas no modelo atômico de Bohr.

Niels Bohr (1885-1962), em 1913, propôs um modelo para o átomo que causou uma ruptura com a física clássica do espaço e tempo contínuos. Para ele, os elétrons se moviam em órbitas circulares e discretas em torno do núcleo atômico. Se o átomo absorvesse uma quantidade específica de energia (o quantum), o elétron se deslocava para uma órbita mais externa; quando voltasse à órbita de origem, a energia era emitida em forma de luz (fóton). Todas essas ações do elétron seriam como um teletransporte, desaparecia em uma órbita e aparecia em outra, instantaneamente.

Após a proposta de Bohr, vários estudiosos se debruçaram em desvendar os mistérios do mundo microscópico e dos saltos eletrônicos. Louis de Broglie (1892-1987) apontou a natureza dual da matéria, como sendo partícula e onda, assim como a radiação tinha essa natureza. Erwin Schrodinger (1887-1961) desenvolveu uma equação de onda para descrever o comportamento do elétron no átomo de hidrogênio. Werner Heisenberg (1901-1976) propôs o princípio da incerteza, afirmando que é

impossível determinar ao mesmo tempo a posição e a velocidade de uma partícula: há uma incerteza associada ao tentar se medir uma das grandezas, o erro na medição da outra aumenta. Tantos outros debruçaram-se em temas mais específicos, como quantização do momento angular e definição do spin, orbitais, e uma série de grandezas quantizadas e descrições probabilísticas. O mundo microscópico, enfim, era muito bem descrito por esse universo quântico, e muito bem corroborado por evidências experimentais cada vez mais acuradas.

Finalmente, a teoria de campos relativísticos descritos na TRE também foi acrescentada no universo quântico, com o advento da Teoria Quântica de Campos, que descreve também campos de força, matéria e energia como grandezas quantizadas, o que culmina na Física de Partículas, descrita na seção 2.5. Tudo parecia seguir um futuro promissor, apenas com um obstáculo que nem causava influência considerável em grandezas microscópicas: o campo gravitacional.

2.4 O problema da unificação

As teorias da Relatividade Geral (TRG) e da Mecânica Quântica (MQ) são distintas, por definição. A TRG explica os fenômenos em escala astronômica, de corpos com grande massa, descreve a dinâmica dos astros e a evolução do Universo. É uma teoria baseada em um espaço-tempo contínuo e bem determinista. A MQ, no entanto, se ocupa em descrever a estrutura básica da matéria e seus componentes microscópicos e é baseada em uma matemática de eventos discretos e probabilísticos.

Em cada nicho, os resultados de ambas as teorias são suficientemente razoáveis para explicar seus experimentos e evidências, o que as deixava coexistirem em pesquisas independentes da Física Moderna e Contemporânea, ainda que fossem teorias essencialmente conflitantes. Na maioria dos fenômenos no Universo, esses conflitos não eram evidenciados. A Relatividade Geral dava conta da explicação em escalas astronômicas e a mecânica quântica, das escalas subatômicas; o convívio entre as duas teorias estava harmonioso, cada uma em seu domínio de validade. Porém, os problemas de singularidade da TRG necessitavam de uma compreensão das leis da Física em termos de efeitos gravitacionais quânticos (Hawking, 2002).

O Big Bang e os instantes logo posteriores devem ser descritos por todas as interações, tanto as eletromagnéticas, forças fraca e forte, bem como a ação gravitacional. Sendo um evento descrito como singularidade na TRG, há uma perceptível demanda em se complementar a teoria com uma boa dose de mecânica quântica. Toda a matéria e energia como conhecemos hoje estariam comprimidas em um mínimo volume, promovendo energias altíssimas para cada partícula subatômica constituinte do Universo. Nesse caso, o problema da MQ está em descrever a gravidade como um campo quantizado, demandando uma reestruturação da geometria do espaço-tempo. Há também uma outra questão: a TRG sendo uma teoria não-linear geraria quantidades infinitas de grandezas, tornando impossível a interpretação Física. Essa última evidência encaixa a gravidade como uma teoria não renormalizável, isto é, não compatível com teorias quânticas (Abdalla, 2005).

Portanto, uma das teorias deverá ceder a outra, como muitos físicos acreditam, ou uma deverá ser modificada para se adequar à outra. Porém, qual a mais compatível? Alguns, como Roger Penrose (1931-), consideram a relatividade geral como a intacta, enquanto para Stephen Hawking (1942-2018) a Mecânica Quântica seria a mais compatível para descrever o problema (Peruzzo, Pottker & Prado, 2013). Ou talvez a solução seja uma forma compatível, matematicamente e experimentalmente, de se incorporar a gravidade como uma das interações fundamentais quantizadas, tentando-se absorver o melhor das duas teorias, o que a teoria das cordas e das supercordas se ocupou em fazer, como descrito na seção 2.6.

2.5 Modelo padrão de partículas

O modelo padrão de partículas busca explicar as interações da natureza através da interação e da classificação das partículas elementares. As partículas até então conhecidas podem ser divididas em

partículas de matéria e partículas de força. Os férmions (partículas de matéria) são partículas de spin semi-inteiro e os bósons (partículas de força) são partículas de spin inteiro (ou nulo). Os bósons são as partículas mediadoras das forças fundamentais entre os férmions. Os férmions (partículas de matéria) são divididos em léptons e quarks. Os quarks podem ser de vários sabores: up, down, strange, charm, bottom e top, a combinação de diferentes tipos de quarks dão origem às partículas que chamamos de hádrons. Os hádrons se dividem em bárions, formados pela combinação de três quarks (ou anti-quarks) e em mésons, formados pela combinação de um quark e um antiquark. Os prótons (formados por dois quarks up e um quark down) e nêutrons (formados por dois quarks down e um quark up), partículas que formam o núcleo atômico, são exemplos de bárions. Já os léptons são partículas elementares que não possuem divisões internas, são elas: elétron, o múon, o tau e seus respectivos neutrinos.

Cada uma das forças fundamentais da natureza, com exceção da gravidade, pode ser explicada por meio da troca de partículas mediadoras, os bósons. O glúon é a partícula mediadora da força nuclear forte, que mantém o núcleo atômico coeso (ou seja, medeia a interação entre os quarks). O fóton é a partícula mediadora da força eletromagnética, que ocorre entre corpos que possuem carga elétrica ou momento magnético. A força eletromagnética é responsável por grande parte dos fenômenos que observamos macroscopicamente (com exceção a aqueles que justificamos com base na força gravitacional). Os bósons W e Z são os mediadores da força nuclear fraca, responsável pelo decaimento de átomos instáveis (átomos radioativos). Por fim, tem-se também a partícula do bóson de Higgs, que é a responsável por conferir massa a todas as outras partículas que a possuem.

O modelo padrão de partículas é o que se tem mais próximo de uma Teoria de Tudo nesse momento. Para que essa teoria possa unificar todos os fenômenos, seria necessário incorporar a ela também a força gravitacional. Para isso, seria necessário encontrar o gráviton, a partícula mediadora da força da gravidade que, por enquanto, é apenas uma previsão teórica. Apesar de todo o esforço, como a interação gravitacional parece não ter a mesma estrutura das outras três interações, o modelo padrão de partículas ainda não é capaz de explicá-la (MOREIRA, 2009).

Estudar as partículas subatômicas é uma tarefa difícil para seres humanos acostumados a enxergar através da reflexão da luz, isso porque, essas partículas não podem ser vistas. Para “iluminarmos” uma partícula seria necessário radiação de pequeno comprimento de onda, dado que as partículas também são muito pequenas. Apesar disso, pequenos comprimentos de onda significam grandes frequências e, grandes frequências significam grande quantidade de energia. Ou seja, ao “iluminar” uma partícula, seria fornecida a ela uma grande quantidade de energia, o que alteraria seu comportamento. Esse problema é descrito pelo princípio de incerteza de Heisenberg. Portanto, como não é possível vê-las, para conhecer as partículas subatômicas, utiliza-se os aceleradores de partículas, como Large Hadron Collider (LHC), por exemplo. Nos colisores é possível observar os efeitos provocados por essas partículas e, então, detectá-las. Como a força gravitacional é desprezível quando se está na ordem de grandeza de uma partícula subatômica, detectar essa interação é praticamente impossível com a tecnologia que se tem hoje e, portanto, ainda não foi possível encontrar o gráviton.

2.6 Teoria das supercordas

A teoria das cordas teve início nos estudos de Gabriele Veneziano (1942) sobre a interação forte. Veneziano encontrou uma função matemática que descrevia as partículas que interagiam através da força forte, mas que não tinha nenhuma explicação física atrelada a ela. Para que essa descrição fosse possível, era necessário considerar que as partículas fossem pequenas cordas bidimensionais vibrantes (Peruzzo, Pottker & Prado, 2013)

Inicialmente a teoria das cordas era capaz de descrever somente os bósons (e, por isso, essa teoria também pode ser chamada de teoria das cordas bosônicas), ao ampliar a teoria também para os férmions, através da ideia da supersimetria, deu-se origem à teoria das supercordas. A supersimetria

prevê que toda partícula subatômica tenha uma partícula supersimétrica a ela, o elétron teria o selétron, o fóton teria o fótino e assim por diante. Sendo assim, para confirmar a supersimetria, é necessário detectar essas partículas previstas teoricamente, o que, ainda assim, não comprovaria que a teoria das cordas é verdadeira (Abdalla, 2005).

A teoria das supercordas, apesar de não possuir nenhuma comprovação experimental, se mostra como um possível caminho para a quantização da gravitação ou, em outras palavras, um caminho para a Teoria de Tudo, ao unir todas as interações fundamentais da natureza em um só formalismo. Nessa teoria, todas as partículas, sejam elas férmions ou bósons, seriam pequenas cordas vibrantes. Essas cordas teriam comprimento de 10^{-33} m, vinte ordens de grandeza menor que o núcleo atômico (Abdalla, 2005). As cordas, que podem ser abertas ou fechadas, vibram com padrões de vibração diferentes (assim como as cordas de um violão). É a partir desses padrões de vibração que as características de cada partícula, como a massa e o spin, seriam determinadas e diferenciadas. Nessa perspectiva, o gráviton seria uma corda fechada, capaz de viajar através das dimensões, e isso explicaria a grande dificuldade de fazer a sua detecção. Já os bósons seriam pequenas cordas abertas, vibrando de forma a constituir uma pequena onda estacionária. Para que essa ideia seja matematicamente possível, seriam necessárias dez dimensões físicas, o que não é nada intuitivo dentro da percepção humana de apenas quatro dimensões (Rivelles, 2007).

Apesar de parecer uma ideia simples, existem cinco formas diferentes de explicar as partículas através de suas vibrações, isto é, existem cinco teorias das cordas diferentes. Entretanto, as várias teorias podem ser apenas formas diferentes de olhar para o mesmo problema; pensando nisso, foi criada a teoria M. A teoria M, M de matriz, mãe ou mistério, é a teoria unificadora de todas as versões de teoria das cordas (Abdalla, 2005). Há quem defenda que a teoria M é a candidata mais promissora à Teoria de Tudo, como também há quem pense que a teoria M é uma perda de tempo. A certeza só o futuro poderá dizer.

3. A unidade didática

A unidade didática foi idealizada para alunos da terceira série do ensino médio de duas escolas particulares do Distrito Federal. Ambas as escolas utilizam material apostilado para todas as etapas do ensino básico. A unidade didática proposta, programada para a duração de 50 minutos, foi aplicada após uma sequência de aulas sobre Física Moderna, ou seja, os alunos já tinham tido contato com os conceitos relacionados à Relatividade e à Física Quântica. As aulas anteriores à unidade, previamente definidas pelo material didático, estão descritas no quadro a seguir:

Quadro 1 - Aulas anteriores à unidade didática

Aula	Conteúdo
1	Introdução à Física Moderna
2 e 3	A relatividade do tempo e do espaço
4	Outras grandezas relativísticas
5	Consequências da relatividade geral
6	Planck e quantização da radiação térmica
7 e 8	O efeito fotoelétrico
9	O modelo atômico de Bohr
10	O modelo padrão de partícula

Fonte: Elaborado pelos autores.

A aula foi iniciada apresentando aos alunos a idealização de uma teoria que pudesse explicar todos os fenômenos da natureza, a Teoria de Tudo. A partir disso, foi feito um breve resumo das

unificações que aconteceram durante a história da Física: a unificação do magnetismo terrestre ao magnetismo das magnetitas, feita por William Gilbert (1544-1603), a unificação da queda dos corpos e do movimento dos astros, feito por Isaac Newton (1642-1726), a unificação da eletricidade dos céus a eletricidade produzida em laboratório, feito por Benjamin Franklin (1706-1790), a unificação da eletricidade e do magnetismo, iniciada por Hans Christian Ørsted (1777-1851), a unificação da eletricidade, magnetismo e óptica pela teoria eletromagnética, feita por James Clerk Maxwell (1831-1879) e a unificação do espaço e do tempo, feita por Albert Einstein (1879-1955)². Após esse primeiro momento, foram retomadas as nuvens de Kelvin (já abordadas na aula 1, conforme a tabela) e a apresentação de uma “terceira nuvem”: as teorias da Relatividade e da Mecânica Quântica não são compatíveis.

Como uma possível alternativa para a resolução do problema de incompatibilidade entre as teorias, retoma-se o modelo padrão de partículas elementares (já discutido na aula 10, conforme a tabela) e discute-se a existência do gráviton, a partícula mediadora da gravidade. Nesse momento também são descritas as dificuldades relacionadas a encontrar experimentalmente essa partícula³. Para dar mais argumentos a favor da busca do gráviton, é apresentada ao alunos a teoria da grande unificação (GUT), baseada na concepção de que no início do universo todas as forças fundamentais da natureza (força nuclear forte, força nuclear fraca, força eletromagnética e força gravitacional) estavam unificadas e foram se separando à medida que o universo se expandiu e se esfriou. Nesse contexto, é evidenciado para os alunos qual seria a energia necessária para unificar essas forças (aproximadamente 10^{19} GeV), e que até hoje ainda não é possível de ser atingida nos aceleradores de partículas. Após essa discussão, apresenta-se aos alunos a Teoria das Cordas.

Para facilitar o entendimento da Teoria das Cordas, escolheu-se apresentá-la por meio de um vídeo disponível no youtube⁴ no canal *Kurzgesagt – In a Nutshell*. O vídeo é uma animação de oito minutos que aborda a busca por uma Teoria de Tudo, o princípio da incerteza, os problemas de incompatibilidade da Relatividade e da Mecânica Quântica, o modelo padrão de partículas elementares e a Teoria das Cordas (assim como os problemas relacionados a essa teoria) de forma bastante didática e acessível. A narração do vídeo está em inglês, mas existe a opção de habilitar as legendas em português, o que torna sua compreensão viável por aqueles que não dominam a língua⁵. Após o vídeo, foi feita uma breve discussão sobre o que foi assistido e uma breve explicação sobre a teoria das cordas. Para isso, retomou-se a ideia de cordas vibrantes (conteúdo estudado na segunda série do ensino médio) e os diferentes padrões de vibração que elas podem apresentar. A partir disso, fez-se uma analogia entre os diferentes padrões de vibração e as partículas elementares, indicando que as características de cada partícula são geradas a partir de um padrão de vibração específico. Por fim, discutiu-se os problemas para a consolidação dessa teoria e a existência da teoria M (que unifica as diferentes teorias das cordas existentes).

Para finalizar a aula os alunos foram orientados a responder um questionário sobre o conteúdo visto. O questionário foi enviado através de um formulário do Google e os alunos enviaram suas respostas de forma virtual. As perguntas do questionário estão descritas a seguir:

1. Por que é importante pensar em uma teoria unificada para as leis do Universo?
2. Qual tentativa de unificação que ocorreu no decorrer da história da Física você mais achou interessante? Por quê?
3. O que são as nuvens de Kelvin e quais as consequências delas no desenvolvimento das teorias do século XX?

² Os episódios históricos de unificação citados estão brevemente descritos nas seções iniciais.

³ A proposta de encontrar experimentalmente uma partícula prevista na teoria também é boa ocasião para desmistificar a ideia de método científico, que dita uma “receita” para a elaboração de novas teorias.

⁴ O vídeo está disponível no endereço <https://youtu.be/Da-2h2B4faU> (último acesso em: 23 de outubro de 2021).

⁵ Nenhum aluno relatou problemas para acompanhar o vídeo com a legenda. Em uma das turmas havia uma aluna com baixa visão, nessa ocasião as legendas foram ampliadas para o maior tamanho possível oferecido pela plataforma.

4. Por que as teorias da Relatividade Geral e a Mecânica Quântica não são compatíveis?
5. O que é um gráviton? Qual a importância de encontrar essa partícula?
6. O que é a teoria da Grande Unificação?
7. Como a Teoria de Cordas resolve o problema da unificação?
8. Quais as vantagens e as desvantagens encontradas na Teoria das Cordas/Supercordas?
9. Em sua opinião, entender o processo histórico da busca de uma Teoria de Tudo facilita o aprendizado de teorias mais modernas sobre o tema?

4. Análise de dados

Os dados a serem analisados foram coletados por meio do questionário, disponibilizado aos estudantes após a aula, para serem respondidos em casa. O ideal é que eles tivessem tempo para resolver essas questões em aula, com as ideias e argumentos ainda frescos. Porém, a própria unidade didática foi programada sem esse tempo, já que foi incorporada a uma sequência de Física Moderna bem limitada, com apenas uma aula relativa à abordagem da Teoria de Tudo.

Essa ação sofreu uma consequência negativa, associada ao ensino híbrido⁶ decorrente da pandemia da Covid-19, que mudou o paradigma da sala de aula presencial para uma sala de aula com uma porcentagem de alunos em casa, em ambas as escolas que nas foram aplicadas essa Unidade. A consequência foi a possibilidade de pesquisa realizada na internet pelos estudantes quando do momento de resolução do questionário. A pesquisa em si não é de todo mal, visto que pode possibilitar uma riqueza maior no vocabulário e nos argumentos dos estudantes. Porém, o índice de plágio de respostas de sites da internet ou entre estudantes foi bem alto. Infelizmente, não foi possível evitar que os estudantes tivessem essa atitude, cabendo aconselhá-los de que a cópia direta do texto de nada contribuiria para a discussão do tema e, inclusive, para essa pesquisa; que a desonestidade deles repercutiria em uma falsa análise de dados sobre o tema pesquisado. A avaliação em ensino de formato híbrido/remoto representou uma problemática a qual os professores se depararam no contexto educacional do período pandêmico.

Os dados, enfim, passaram por alguns filtros. O primeiro, foi de compromisso dos estudantes: como não foi uma atividade obrigatória na avaliação da escola, nem todos os estudantes da turma o fizeram. O segundo filtro foi o plágio: dos que fizeram, foram retirados os textos que eram cópias exatas ou levemente adaptadas de sites da internet como Brasil Escola, Wikipédia etc. O terceiro filtro foi de repetição de ideias: algumas respostas eram bem parecidas em conteúdo, e foi preferível diminuir a análise em trechos coletados que mais se destacaram em escrita e argumentação. As respostas que sobreviveram a esses recortes e filtros, foram apresentadas quase em íntegra, e analisadas, comparando os textos das respostas com o texto da Unidade Didática e das possíveis intervenções do professor.

Pergunta 1 - Por que é importante pensar em uma teoria unificada para as leis do Universo?

Quadro 2 - Respostas dos alunos à pergunta 1.

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	<p>“aprimorar os conhecimentos físicos existentes para que se complementem.”</p> <p>“meio que simplificar.”</p>

⁶ A unidade didática foi aplicada entre os meses de junho e agosto de 2021, nesse período o decreto Nº 41.913, de 19 de março de 2021, estava em vigor no DF. O decreto impunha que as salas de aulas deveriam funcionar com o limite máximo de 50% dos alunos de forma presencial. O restante dos alunos, que não estavam presencialmente na escola, assistiu a aula de casa. Todas as aulas estavam sendo transmitidas de forma virtual, através de reunião do Google Meet.

	<p>“ficaria mais simples de compreender.”</p> <p>“para melhor compreensão, uma vez que a natureza é uma só e suas leis são interligadas.”</p> <p>“porque pensar nas leis que regem o universo de forma separada e tentar entendê-lo é como tentar entender um quebra-cabeça desmontado.”</p>
B	“explicaria muitos fenômenos ainda hipotéticos.”
C	<p>“evitar o conflito entre teorias incompatíveis”</p> <p>“em alguma hora, as teorias podem entrar em conflito.”</p>
D	“Para que achismos não sejam levados em consideração.”

Fonte: Elaborado pelos autores.

As respostas deste item versam em pontos interessantes para a Ciência. A resposta principal (conjunto A), que houve mais dissertações a respeito, apontou a necessidade de unificação para simplificação e complementação das teorias outrora separadas, tendo como foco a compreensão dos fenômenos universais. Ainda houve outras respostas que trouxeram os temas de previsão de fenômenos (conjunto B), o problema de não-unificação poder denotar crises (conjunto C) e a contraposição de ideias de senso comum (conjunto D). Os estudantes já conseguiram reunir nessas respostas elementos gerais sobre o texto e sobre o problema, como a incompatibilidade da Teoria da Relatividade e a Mecânica Quântica, a previsão da partícula gráviton; elementos esses que podem ser inferidos, apesar da resposta simplificada do item.

Pergunta 2 - Que tentativa de unificação que ocorreu no decorrer da história da Física você mais achou interessante? Por que?

Quadro 3 - Respostas dos alunos à pergunta 2.

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	<p>“A união da eletricidade com o magnetismo, formando o que hoje é chamado por Eletromagnetismo. Com essa união é possível explicar inúmeros fenômenos que ocorrem no nosso dia a dia, desde os mais comuns aos mais peculiares.”</p> <p>“Unificação da energia elétrica com a magnética. Nunca imaginei que pudessem ser ‘a mesma coisa’ uma vez que estudamos primeiro a energia elétrica, associando-a a circuitos, e pela associação de magnetismo com ímãs.”</p> <p>“Unificação do eletromagnetismo. Juntou luz, magnetismo e radiação em uma só teoria.”</p>
B	<p>“a de Newton a fim de explicar a gravidade, a queda dos corpos da terra e dos corpos em órbita.”</p> <p>“A união do Céus e a Terra sob as mesmas leis, a gravitação universal. Eu acho a mais interessante porque é ela que mantém os planetas em órbita.”</p>
C	“Do Einstein, quando ele juntou o espaço e o tempo. Achei muito interessante, já que, normalmente, a gente nunca imaginaria que o espaço e o tempo estejam relacionados.”
D	“A tentativa de Einstein de unificar a gravidade com o eletromagnetismo, pois acredito que uma das chaves para desvendar o universo está na gravidade e tentar uni-la com outra teoria é um grande passo para a ciência.”
E	<p>“Mundo em 10 dimensões, porque o conceito de várias dimensões é interessante.”</p> <p>“A Teoria das cordas, os filamentos de energias (as cordas) são muito interessantes no meu ponto de vista, a vibração; se assemelha muito com o som, nano sinfonias. a refração das possíveis cores, intensidades das cordas e a Teoria das 10 dimensões, que apenas 3 foram de fato comprovadas.”</p>

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os estudantes foram bem sinceros ao descrever suas opiniões e predisposições às unificações que achavam mais interessantes. As respostas foram bem variadas e aproveitamos os trechos que seriam mais convidativos à análise.

No conjunto A, é possível perceber a empolgação dos estudantes quanto à unificação de eletricidade e magnetismo, apresentando fenômenos que, no senso comum, não aparentam ter origens próximas, como a corrente elétrica, o magnetismo do ímã, a luz e a radiação. Por se tratarem de estudantes da 3ª série, essa unificação foi recentemente apresentada a eles no currículo tradicional da Física Clássica, sendo enfatizados os fenômenos e problemas como áreas distintas; talvez aqui resida o interesse nesse episódio histórico.

No conjunto B, os estudantes citaram a contribuição de Newton para a universalização da ação gravitacional, citando a queda livre e a órbita dos planetas como fenômenos que foram relacionados. O interesse em assuntos da Astronomia aproxima os estudantes destes temas que versam sobre a gravidade e o espaço. No conjunto C, esse mesmo interesse pode ter fomentado a resposta sobre a unificação do espaço e do tempo, na Teoria da Relatividade Restrita. No conjunto D, temos uma resposta curiosa, em que o estudante aponta uma possível tentativa de Einstein em unificar a Gravidade e o Eletromagnetismo, ainda que a aula tenha dado ênfase à unificação via teoria da Relatividade Geral, em que Einstein acrescenta uma teoria geométrica para a ação gravitacional. De fato, além de descrever o encurvamento da trajetória da luz próximo a corpos massivos, Einstein, à sua época, dedicou-se a estudar a unificação entre as duas interações fundamentais Gravitação e Eletromagnetismo, dado que as interações Forte e Fraca não eram ainda conhecidas. A resposta do estudante foi fruto, provavelmente, de uma pesquisa na internet.

No conjunto E, o interesse é pela teoria de unificação mais recente, a Teoria das Cordas. Uma possível análise social sobre esse tema é o universo ficcional do Cinema, da Literatura, nos debates e podcasts que viralizam na internet, nas notícias em portais seguros ou sem respaldo científico sobre assuntos ligados à Física Contemporânea. Os estudantes estão curiosos para entender a beleza das cordas fundamentais vibrantes, das múltiplas dimensões e vislumbram também participar, ainda que como espectadores, dessas descobertas. Durante os debates em aula, muitos eram os momentos em que os estudantes queriam discutir sobre ideias recentes que viram em filmes ou leram em alguma rede social, o que deixava mais enriquecedor o diálogo, fomentando interesse até em quem poderia estar um tanto disperso na aula.

Pergunta 3 - O que são as nuvens de Kelvin e quais as consequências delas no desenvolvimento das teorias do século XX?

Quadro 4 - Respostas dos alunos à pergunta 3.

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	<p>“a física é um céu azul, e existem duas nuvens cinzas que atrapalham o céu a brilhar”</p> <p>“são problemáticas ainda não solucionadas, o que faltava para a completa ‘teorização de tudo’.”</p> <p>“As nuvens são coisas existentes que ainda não foram estudadas ou não foram estudadas o suficiente, nada comprovado e ou explicado.” “São partes da física obscuras, porque ainda não foram desvendadas. As consequências dela são o desenvolvimento das teorias quânticas e relativísticas”</p>
B	<p>“O fracasso em medir a velocidade do Éter e a dificuldade de explicar a distribuição de energia na radiação de um corpo aquecido”</p> <p>“As nuvens de Kelvin se tratavam de duas: a primeira era se o éter existia ou não o que resultou na relatividade e a radiação do corpo negro o da física quântica”</p>
C	<p>“Teoria da relatividade e a mecânica quântica, os dois pilares da física moderna.”</p>

	“Uma forma de explicar a teoria da relatividade e a mecânica quântica”
D	“A forma com que Kelvin conseguiu relacionar eletricidade com magnetismo.”

Fonte: Elaborado pelos autores.

No conjunto de respostas A, ficou evidente que os estudantes entenderam a analogia de Lorde Kelvin sobre as problemáticas que viriam a ser desvendadas no século XX, tanto que vários estudantes transcreveram a própria citação ou parafrasearam as palavras de Kelvin naquela ocasião. No conjunto B, as respostas foram mais técnicas, descrevendo que problemas eram esses e que consequências eles levaram. Notamos aqui os estudantes mais concentrados no tema, que preferiram investir em respostas mais rebuscadas e menos generalizadas dentro do tema. Estes estudantes, também, podem ter-se utilizado de conhecimentos prévios da própria Introdução à Física Moderna, no início da Sequência Didática, em que o próprio material didático usado na escola descreve o episódio da fala de Kelvin como uma introdução às descobertas após o século XIX.

No entanto, nem todos os estudantes conseguiram ter o discernimento dos estudantes dos conjuntos anteriores, pois os do Conjunto C confundiram as problemáticas (nuvens) com as próprias teorias que viriam a tentar explicá-las. Esse equívoco pode estar associado à própria não-compreensão dos dois fenômenos explicitados nas “nuvens”, que pouco são comentados na Física Clássica. Os debates acerca do Éter e seus desdobramentos no decorrer da História da Física não são citados no estudo da Óptica nos livros didáticos, que enchem páginas de problemas geométricos com prismas, espelhos e lentes, e não tecem comentários sobre, por exemplo, a briga histórica entre a natureza corpuscular ou ondulatória da luz. Quanto à radiação do corpo negro, pouco se comenta sobre esse tema na Termodinâmica de Ensino Médio.

No caso do Conjunto D, o estudante não deve ter se atentado realmente ao texto e à aula, escrevendo uma resposta bem incoerente ao que foi abordado.

Pergunta 4 - Por que as teorias da Relatividade Geral e a Mecânica Quântica não são compatíveis?

Quadro 5 - Respostas dos alunos à pergunta 4.

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	“São muito diferentes para descrever o funcionamento do universo” “Pois não fazem parte da mesma unificação.” “As duas são excelentes pra explicar mas se uma estiver certa a outra estará errada”
B	“porque abrangem áreas da física diferentes, que não possuem as mesmas propriedades.” “Pois a teoria da relatividade permitiu explicar desde o nascimento do Universo até a órbita dos planetas e os buracos negros já a Mecânica Quântica estuda os sistemas físicos cujas dimensões são próximas ou abaixo da escala atômica (átomos..)” “Funcionam apenas no contexto em que foram criadas. Não fazem sentido se aplicadas no contexto da teoria inversa. O descobrimento do gráviton unificaria as duas.”
C	“Porque enquanto uma toma o tempo e espaço como grandezas absolutas a outra as toma como grandezas relativas.
D	“Porque uma teoria não se encaixa matematicamente com a outra.” “Porque as duas teorias não se conversam matematicamente”

Fonte: Elaborado pelos autores.

As respostas do Conjunto A são muito genéricas e não esclarecem a problemática da pergunta. A própria pergunta é um campo delicado de se tratar, porque é bem difícil de se comentar em nível

médio essa incompatibilidade teórica sem apresentar as equações que regem cada teoria. Mesmo assim, como a proposta da unidade didática foi apontar esses detalhes, talvez tenha sido um ponto a se questionar o nosso papel, de mediador, ao conduzir a apresentação desse tema. Mas, apesar disso, os estudantes também pareceram desatentos ao tema por não tecer um comentário sequer sobre as diferenças entre as teorias.

Os estudantes do Conjunto B também não chegaram ao ponto principal, mas apontaram evidências sobre as diferenças de ordem de grandeza para a atuação das duas teorias: a relatividade em nível astronômico e a quântica em nível subatômico. Os estudantes do Conjunto C apresentam argumentos que, prioritariamente, diferenciam o sistema de referência de Galileu e Newton e os referenciais relativísticos de Lorentz e Einstein, mas que no fundo podem também se referir ao espaço contínuo da relatividade ou espaço discreto da quântica, já que eles não especificaram que grandezas eram absolutas ou relativas.

Os estudantes do Conjunto D acertaram no ponto principal da problemática. No texto foi apontado que as dificuldades em se unificar as duas teorias eram de incompatibilidade matemática. A resposta concisa dos estudantes também demonstra o quanto eles não estão inteirados dos problemas matemáticos, se são de natureza geométrica, estatística ou diferencial, e foram coerentes em não mencionar.

Pergunta 5 - O que é um gráviton? Qual a importância de encontrar essa partícula?

Quadro 6 - Respostas dos alunos à pergunta 5.

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	<p>“A teórica partícula da gravidade. Se os grávitons não existem, isso significa que a gravidade não é uma teoria quântica de campos.”</p> <p>“É a partícula subatômica que corresponderia ao fenômeno da gravidade e ela servia como uma consolidação da confirmação da Teoria de Tudo ”</p> <p>“São as moléculas da gravidade, ainda não se foi descoberto realmente, mas acreditamos que exista, e sua importância tem principalmente a função de aperfeiçoar as leis da física.”</p> <p>“Uma partícula que afeta a gravidade. Poderíamos compreender melhor a gravidade dos corpos, unindo relatividade e quântica.”</p>
B	<p>“Graviton é uma partícula elementar de interação, um bóson, e corresponde à gravidade. É necessariamente importante encontrar essa partícula já que nisto se encontra a chave da unificação da relatividade com a Quântica.”</p> <p>“É uma partícula elementar hipotética que seria a responsável pela transmissão da força da gravidade.”</p> <p>“Graviton é o bóson (partícula elementar de interação) da gravidade. Encontrar essa partícula unificaria os dois ramos de estudo da física moderna: a quântica e a relatividade.”</p>

Fonte: Elaborado pelos autores

As respostas do Conjunto A são bem elaboradas, não são de todo leigas, mas dão uma ideia superficial da entidade gráviton, sem uma função particular para o objeto estudado. Tanto é assim que fazem errôneas associações com entidades químicas, como a molécula, descrevendo a gravidade como um fenômeno corpuscular que necessariamente necessita de partícula subatômica, ou que é afetado por, ainda que comentando, inclusive, a teoria quântica de campos.

No conjunto B, há respostas mais coerentes com a proposta teórica do gráviton, que é um hipotético bóson (partícula mediadora) da interação gravitacional. Apesar de um deles mencionar o termo força gravitacional (termo que não é utilizado nem na Relatividade, nem no Modelo de

Partículas), a ideia de transmissão e troca ficou evidenciado. Aqui é importante mencionar também que eles já têm os requisitos para escreverem essas respostas, visto que a aula desta unidade didática faz parte de uma maior sequência, que leva em conta o estudo de Física Moderna e Contemporânea.

Importante ressaltar também que essa resposta foi a mais copiada de sítios da internet, o que pode estar associado a vários fatores, mas o principal deve-se ao fato de ser um termo novo e desconhecido para os estudantes, que pode não ter sido claramente entendido pelos estudantes.

Pergunta 6 - O que é a teoria da Grande Unificação?

Quadro 7 - Respostas dos alunos à pergunta 6.

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	<p>“Uma teoria que une a Física como um todo, incluindo da relativística à Quântica.”</p> <p>“É uma teoria que juntaria, procuraria explicar e conectar em um só os fenômenos físicos”</p> <p>“Seria um conjunto de teorias para tentar explicar a lei universal, como a Teoria das Cordas e outras com diferentes explicações”</p> <p>“Uma teoria pra unir a teoria da Relatividade Geral e a mecânica quântica”</p>
B	<p>“Que no começo o universo quase não havia reações,mas com a união das partículas começaram a surgir eletromagnetismo,gravidade etc.”</p> <p>“É a teoria de que todas as interações (a Gravidade, a Eletromagnética, a Nuclear fraca e forte) são unificáveis.”</p> <p>“Ela fala sobre o que aconteceu nos primeiros momentos do big bang onde todas as forças estavam unificadas e conforme o universo foi expandindo essas forças foram se espalhando.”</p>

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nestas respostas, há uma divergência entre dois conceitos: o termo “Teoria de Tudo” e o termo “Teoria da Grande Unificação”. É natural que se confunda os dois termos, já que parecem objetivar o mesmo fim e por pertencer à mesma unidade didática. Nesse sentido, segundo os estudantes do conjunto A, os termos são sinônimos, já que ambos seriam uma teoria única para contemplar todos os fenômenos físicos do Universo, relacionados desde os níveis subatômicos aos astronômicos. Porém, essa proximidade dos conceitos não é o que se traduz no texto. O termo “Teoria da Grande Unificação” traduz o aspecto das interações entre as partículas, que ora no Big Bang e logo depois estavam todas agregadas em uma só transmissão de forças. Com o passar do tempo, as interações foram se separando dando lugar para as quatro grandes fundamentais. Os estudantes do Conjunto B de respostas, chegaram mais próximos a esse conceito e detalharam isso em seus argumentos.

Pergunta 7 - Como a teoria de cordas resolve o problema da unificação?

Quadro 8 - Respostas dos alunos à pergunta 7

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	<p>“Nela, cada partícula é uma vibração no espaço-tempo, como uma corda que vibra em diferentes frequências e cada uma dessas seria uma partícula diferente.”</p> <p>“A Teoria das Cordas se trata que as partículas são cordas que vibram, e cada vibração vai dar uma característica diferente para cada partícula.”</p> <p>“Transformando as partículas em ‘cordinhas’.”</p>

	“Pois cada vibração das cordas pode ser um efeito como elétrons, quarks.”
B	<p>“Ela simplificaria e explicaria todas as teorias”</p> <p>“Ela afirma que todas as partículas que formam a matéria são formadas por apenas uma identidade e isso explicaria a divergência entre algumas áreas físicas.”</p> <p>“A Teoria das Cordas é uma tentativa de unificar a teoria da relatividade e a mecânica quântica.”</p>

Fonte: Elaborado pelos autores.

A expectativa dessa pergunta era que os estudantes escrevessem sobre a analogia da vibração de cordas e as entidades fundamentais da Teoria de Cordas. As respostas do Conjunto A mencionam a frequência e a diferenciação de vibração que origina a caracterização de cada partícula. As respostas do Conjunto B não conseguiram chegar nessa pontuação, mas lembraram o papel de unificação da teoria.

Pergunta 8 - Quais as vantagens e as desvantagens encontradas na teoria das cordas/supercordas?

Quadro 9 - Respostas dos alunos à pergunta 8.

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	<p>“É a candidata mais plausível para a Teoria da Unificação, mas para ser efetivada aquela exige algo em torno de 10 dimensões.”</p> <p>“A vantagem é que a Teoria das Cordas é muito boa e os problemas são que não temos tecnologia para detectar as cordas, e são necessárias onze dimensões para satisfazer a teorias.”</p> <p>“Ela não funciona em um universo tridimensional, mas em uma com dez dimensões. Se ela for comprovada, existem sete direções ainda desconhecidas por nós e a tecnologia que temos atualmente não é capaz de comprovar isto.”</p> <p>“As vantagens são que é uma teoria que conciliaria todas as teorias existentes e assim facilitaria a compreensão do universo, a desvantagem principal é que não se consegue comprovar e fazer experimentos concretos e nem cálculos matemáticos, por se tratar de algo tão complexo.”</p>
B	<p>“Vantagens estaríamos a um passo de descobrir a Teoria de Tudo . desvantagens se ela fosse realmente aceita outras coisas teriam que ser aceitas também precisaríamos admitir que as cordas seriam mais rápidas que a velocidade da luz, a corda seria tão pequena que mesma com a tecnologia de hoje não enxergaríamos e como acreditar que ela vive em 8 dimensões.”</p>
C	<p>“Desvantagens: Relatividade Geral não consegue explicar a teoria do Big Bang nem o comportamento dos buracos negros. a Física Quântica não oferece uma explicação satisfatória para a gravitação. Vantagens: unifica essas duas principais teorias da Física Moderna. “</p>

Fonte: Elaborado pelos autores.

A grande maioria das respostas (Conjunto A) versa sobre a Teoria das Cordas ser uma boa Teoria de Tudo, que unificaria de vez as divergências impostas nas teorias modernas de relatividade e quântica. Ao mencionar as dimensões não percebidas por instrumentos tecnológicos mostra o quanto os estudantes perceberam quais os desafios dos cientistas que se concentram nessa teoria. O aparato técnico e a comprovação empírica da matemática associada é realmente o principal empecilho para uma maior credibilidade à Teoria das Cordas. A resposta do Conjunto B está separada do primeiro Conjunto, porque aponta desafios para a ciência moderna e contemporânea, como uma possível quebra do limite das velocidades das partículas no Universo conhecido.

A resposta C se equivoca ao apontar os problemas das teorias da Relatividade e da Mecânica Quântica em separado, e descreve a unificação destas como uma vantagem ao se aliar à Teoria das Cordas. Realmente, a unificação é uma boa vantagem, mas a problemática da Teoria das Cordas não está nos problemas das teorias anteriores, já discutidas em uma pergunta anterior, mas ensimesmada naquela que seria a solução, por apresentar uma entidade de difícil detecção.

Pergunta 9 - Em sua opinião, entender o processo histórico da busca de uma Teoria de Tudo facilita o aprendizado de teorias mais modernas sobre o tema?

Quadro 10 - Respostas dos alunos à pergunta 9.

Conjunto de Respostas	Transcrição dos Trechos
A	“não, pode-se facilitar algumas coisas, mas as teorias por si só podem ser compreendidas de forma isoladas, mas essa é uma teoria que todos devem aprender, pois é uma das mais interessantes.”
B	“Mais ou menos, por mais interessante que possa parecer é algo muito complicado e ainda sendo um foco de estudo onde não é 100% comprovado”
C	<p>“Sim, uma vez que aprende-se com os erros das teorias fracassadas e busca-se moldar uma a qual se encaixe nos parâmetros plausíveis.”</p> <p>“Se as teorias mais antigas não forem entendidas com clareza, acho que essa teoria acaba dificultando um pouco o entendimento.”</p> <p>”Acredito que sim, a partir dos estudos de teorias do passado pode-se compreender os erros e em determinados momentos aproveitar algumas coisas, além de entender todo o processo por trás disso.”</p> <p>“Sim, muitas perguntas e ou questionamentos internos e ou sociais podem ser sanados por coisas já descobertas, mas também podem surgir outros questionamentos, desencadeando novas perspectivas, e assim surgem outras dúvidas e novas pesquisas e o nível de conhecimento e precisão aumenta.”</p> <p>“Sim pois coloca de forma linear e cronológica facilitando a compreensão dos fenômenos e como eles agem juntos”</p> <p>“Com certeza perceber a origem ou até mesmo os erros cometidos no passado (início) ajuda ter uma visão mais ampla e melhor entendimento.”</p>

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nesta última pergunta, os estudantes já deviam estar cansados e muitos responderam apenas que “Sim”, sem justificar suas opiniões. Sem entender a motivação, resolvemos não acrescentar essa resposta na tabela.

A resposta negativa do Conjunto A se deu com uma opinião mais contrária ao trabalho apresentado. A todo momento, o texto demonstra a busca dos cientistas pela unificação das teorias. No entanto, este estudante se mostrou reticente à unificação e apontou as teorias isoladas como uma alternativa melhor para o problema de explicação do Universo. Ao final, em contrapartida, respeitou a Teoria de Tudo, assumindo ser interessante e que deve ser discutida. Esse argumento honesto e cordial deixa a respostas bem coerente a um grande desafio no campo das Ciências, que é discutir com civilidade opiniões e posições contrárias, com a mesma criticidade de investigação.

A resposta do Conjunto B foi menos diplomática e descreveu a complexidade como um fator negativo para se entender a Teoria, além da não comprovação entre a comunidade científica, talvez criticando também a abordagem histórica, que não facilitou o aprendizado desse processo.

O Conjunto C de respostas concentra o cerne principal desta pesquisa e o objetivo principal de qualquer sequência didática de abordagem histórica. Os estudantes concluíram que o processo de estruturação de uma teoria se dá por erros e remendos, por testes que podem prolongar por anos, que

as teorias anteriores servem de contrapartida e alicerce para as teorias que virão. Portanto, eles perceberam que as teorias científicas não são datadas historicamente ou que são resultados de insights geniais de pessoas geniais, mas que são compostas por colaborações anteriores, processos históricos e sociais e feito por pessoas reais, que podem e irão errar, já que as teorias vigentes também serão substituídas por teorias mais acuradas. Apontaram, por fim, características do ensino tradicional da História, como a cronologia linear, baseada em resultados do passado que servirão como espelho de decisões futuras, sintetizando por fim o belo casamento entre história e ciência.

5. Considerações finais

A proposta de apresentar a Teoria das Cordas como uma possível candidata a Teoria de Tudo nasceu de uma necessidade em finalizar o curso de Física Moderna e Contemporânea da 3ª série com um sentimento e desejo de continuação da pesquisa científica, sem responder a muitas perguntas, seguindo a intencionalidade dos filmes que têm final aberto e que causam debate entre os espectadores. Ainda que sejam estratégias de ensino válidas, explanar sobre a fotografia do Buraco Negro ou mostrar um catálogo colorido das partículas conhecidas podem gerar o sentimento oposto ao desejado, de que tudo já foi descoberto, e que os cientistas não precisam mais se debruçar sobre as problemáticas que envolvem as grandes questões da Física.

Ao final da sequência, quando ouvimos (e lemos) o interesse dos estudantes em entender como tudo pode ser unificado, que teorias outrora incompatíveis podiam se aliar, baseado no estudo de episódios na História da Ciência, pudemos perceber eles conseguiram alcançar com êxito o objetivo planejado. A resposta à última pergunta do questionário apresentou a maturidade dos estudantes em entender o processo evolutivo das teorias nas Ciências, ligado a erros e incorporações de outras teorias.

Como sugestão, uma possível décima pergunta ao questionário, em aplicações futuras, possa traduzir diretamente o sentimento desejado: “E agora, o que virá? A Teoria das Cordas conseguirá explicar o funcionamento total do Universo? Quais são suas expectativas? O que pode dar certo? O que pode dar errado? ...”. E então, deixá-los vislumbrar o imprevisível, construir hipóteses, investigar velhas e novas saídas para o problema. Os estudantes, irão, enfim, aproveitar o espírito científico descrito no texto motivador e usá-lo como combustível para futuros resultados.

A pesquisa reforça a necessidade em não se restringir o Ensino da Física à apresentação de um conjunto de fórmulas pouco contextualizado sobre os temas da Física Clássica, cedendo espaço a abordagens históricas e conceituais que enfatizam a ciência como um processo em constante construção, do qual os estudantes fazem parte. A motivação e o interesse que esse tipo de abordagem em sala de aula promove impacta certamente no desenvolvimento do gosto científico e atração às carreiras científicas.

Referências

Abdalla, E. (2005) Teoria quântica da gravitação: cordas e teoria M. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27(1), 147-155.

Brasil. (2018). Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília.

Hawking, S. (2002). *O Universo Numa Casca de Noz*. São Paulo. Editora ARX.

Martins, A. F. P. (2007) História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 24(1), 112–131.

Martins, R. A. (1986). Oersted e a descoberta do eletromagnetismo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10(1), 89-114.

Moreira, M. A. (2009). O modelo padrão da física de partículas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31(1).

Moreira, M. A. (2017). Grandes desafios para o ensino da Física na educação contemporânea, *Revista do Professor de Física*, 1(1). Acesso em 9 de setembro de 2023, <https://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/7074/5725>.

Moura, B. A. (2019). *A filosofia natural de Benjamin Franklin: traduções de cartas e ensaios sobre a eletricidade e a luz*. São Bernardo do Campo: Editora da UFABC.

Ostermann, F. & Moreira, M. (2000). Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. *Investigações em Ensino de Ciências*, 5(1), 23-48.

Peebles, P. J. E. (2002). *Nineteenth and twentieth century clouds over the twenty-first century virtual observatory*. In: *Toward an International Virtual Observatory*. Springer, Berlin, Heidelberg, p.1-10.

Peruzzo, J.; Pottker, W. E. & Prado, T. G. (2013) *Física Moderna e Contemporânea*. São Paulo: Editora Livraria da Física, v. 1 e 2.

Rivelles, V. O. (2007). A teoria de cordas e a unificação das forças da natureza. *Física na Escola*, 8(1), 10-16.

SILVA, C. C. (Org.). (2006). *Estudos de História e Filosofia das Ciências: subsídios para a aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física.

Whittaker, E. (1951). *A history of the theories of aether and electricity*. London: Thomas Nelson and Sons Ltd.