

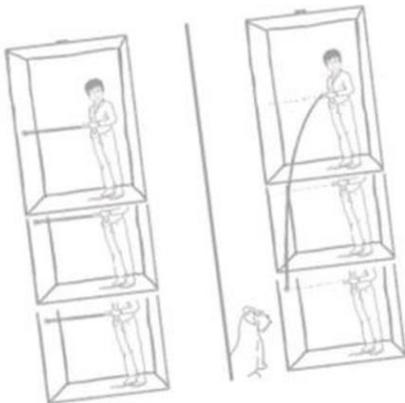


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO NACIONAL
PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 20

PRODUTO EDUCACIONAL

A CURVATURA ESPAÇO-TEMPO DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS: VAMOS CONHECER?

Autores:
NIVALDO BERTOLINI
BRENO FERRAZ DE OLIVEIRA
HATSUMI MUKAI



Produto Educacional da dissertação apresentada ao Polo 20 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física no Ensino Médio.



Orientador: Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira
Coorientadora: Profa. Dra. Hatsumi Mukai



Maringá - PR
2023

APRESENTAÇÃO

Preparar aulas com recursos e técnicas diversas, objetivando que os alunos adquiram os conhecimentos propostos consiste em parte do trabalho do professor. A escolha dos recursos e técnicas pode se transformar em um grande desafio, pois essas escolhas irão colaborar diretamente para que seu trabalho seja eficiente e verdadeiramente transformador, despertando o interesse, a participação ativa e a aprendizagem potencialmente significativa por parte dos alunos.

Este Produto Educacional (PE) apresenta uma proposta de abordagem da Teoria da Relatividade de Albert Einstein, marco da física no início do século XX. Para o desenvolvimento do PE, utiliza-se como instrumento metodológico uma Sequência Didática (SD). A construção da SD está elaborada em torno de uma história em quadrinhos (HQ) que, partindo de uma problematização inicial, apresentação da situação, motiva uma produção inicial dos alunos, para a seguir, o desenvolvimento dos módulos de atividades e concluindo, os alunos apresentarem uma produção final.

A problematização sugerida foi o desvio da luz de estrelas pelo campo gravitacional do Sol, observado durante o eclipse em Sobral, Ceará, em 1919. Para explicar o fenômeno observado, a cada aula tópicos da Teoria da Relatividade Restrita e Geral surgem nos diálogos da HQ, até se chegar à curvatura do espaço-tempo na presença de uma grande massa.

Ao transcorrer as unidades didáticas da SD, o tema da Teoria da Relatividade é apresentado por três simpáticos cachorrinhos (Duque, Bob e Ben) que nos auxiliam, de forma lúdica, na aventura do conhecimento. Utiliza-se além da HQ, textos de apoio, simuladores, vídeos, produção de atividades por parte dos alunos. Sendo a Teoria da Relatividade um tema da física que foge ao nosso senso comum, a utilização de vários recursos didáticos para sua abordagem se mostra oportuna.

Por conta das características do trabalho, a SD além de desenvolver o conteúdo físico, contemplado no contexto das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, possibilita a interdisciplinaridade com as componentes curriculares de Matemática, Arte e História.

Este texto é parte integrante da referência Bertolini (2023).

Maringá, 30 de agosto de 2023.

Os autores.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	4
2 – JUSTIFICATIVA.....	5
3 – OBJETIVOS.....	7
4 – METODOLOGIA.....	8
4.1 – Teoria da Aprendizagem Significativa.....	8
4.2 – Sequência Didática.....	11
4.3 – Histórias em Quadrinhos como instrumento de ensino.....	13
4.4 – Recursos.....	15
4.5 – Avaliação.....	16
5 – ORGANIZAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	17
6 – UNIDADES DIDÁTICAS.....	19
Unidade Didática 1.....	20
Unidade Didática 2.....	26
Unidade Didática 3.....	32
Unidade Didática 4.....	38
Unidade Didática 5.....	44
Unidade Didática 6.....	52
Unidade Didática 7.....	57
Unidade Didática 8.....	63
7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APÊNDICE I - MATERIAL DO ALUNO.....	68

1 – INTRODUÇÃO

A Física é uma ciência dinâmica e em constante transformação à medida que novas tecnologias vão se desenvolvendo e novas necessidades são criadas na sociedade.

Nesse sentido, a partir do início do século XX, as descobertas científicas aconteceram de forma tão rápida que o sistema de ensino, muitas vezes inerte por falta de recursos dos mais diversos, não conseguiu dar conta de atender a todas essas novas descobertas.

Analisando alguns livros didáticos do ensino médio, disponibilizados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) e utilizados até o ano de 2011 pelas escolas públicas, pôde-se perceber que a Física ensinada era predominantemente baseada nas descobertas dos séculos XVII até o XIX. Toda revolução ou evolução surgidas desde o início do século XX ficavam limitadas a poucos capítulos ao final do volume reservado ao terceiro ano do ensino médio ou eram apresentadas como textos complementares no decorrer dos volumes utilizados durante todo o ensino médio¹.

A partir de 2022, as escolas públicas receberam novos livros didáticos, já adequados à proposta do Novo Ensino Médio². Entretanto, a abordagem do tema apresentou-se com aspecto apenas de divulgação, sem muito aprofundamento, mesmo que algumas das obras expusessem equações matemáticas e citassem fenômenos como buracos negros, ondas gravitacionais, lentes gravitacionais e a aplicação tecnológica em aparelhos de GPS. Uma das obras nem apresentava o conteúdo sobre teoria da relatividade.

Surgiu, então, a necessidade da abordagem de temas chamados tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) com os alunos na educação básica, abrindo os horizontes da ciência para eles, atualizando o currículo escolar como também a produção de ferramentas metodológicas para auxiliar os professores.

Nesse contexto, um assunto pouco abordado é a Teoria da Relatividade de Einstein, que surge como resposta para explicar a incompatibilidade entre o eletromagnetismo de Maxwell e a teoria clássica newtoniana da Física, quanto ao

¹ Foram pré-analisadas as obras de várias Editores que fornecem materiais para o Programa Nacional do Livro Didático: Ática (duas obras), Brasil, FDT, Moderna, Saraiva, Scipione e SM.

² Os livros didáticos analisados para o Novo Ensino Médio foram das seguintes editoras: FTD, Moderna, Scipione e SM.

problema em responder para qual referencial o valor da velocidade da luz (onda eletromagnética) deveria ser analisado. Realizaram-se vários experimentos em busca desse referencial privilegiado, o éter, porém ele não foi detectado. A necessidade de mudança na forma de como se entende o mundo e os eventos recorrentes a noção de tempo e espaço é um dos principais fatores que dificultam a assimilação dos conceitos da teoria da relatividade. Outra linha de pesquisa afirma que o problema da compreensão e até mesmo do aceite da teoria da relatividade não estão necessariamente na complexidade das equações matemáticas, mas, “no fato de a relatividade nos obrigar a reexaminar, criticamente, as nossas ideias de espaço e tempo” (HALLIDAY, 1995, p. 123). O espanto inicial diante da proposta é justificado pelo fato de todos os eventos que se podem observar no cotidiano acontecerem com velocidades muito pequenas quando comparadas à velocidade da luz.

O presente PE visa apresentar uma proposta de sequência didática, estruturada segundo as diretrizes de Antoni Zabala (ZABALA, 1998), utilizando história em quadrinhos para o desenvolvimento da teoria da relatividade de Einstein, com alunos de 2º e 3º anos do ensino médio.

Partindo-se de um evento real, o eclipse observado na cidade cearense de Sobral, em 1919, foi determinante para esta pesquisa, a qual tem como objetivo levar esses alunos a conhecer a proposta da teoria da relatividade e as suas aplicações tecnológicas, como o *Global Positioning System*³ (GPS) e a ferramenta para estudos cosmológicos.

Fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, a escolha de história em quadrinhos como ferramenta de aprendizagem não só contribui para a liberdade de imaginação dos(as) estudantes, necessária para tratar a temática da relatividade, como também possibilita a utilização de uma metodologia dinâmica que leve o aluno à leitura, à interação com o texto, à produção de novos quadrinhos e ao desenvolvimento de atividades lúdicas, visando à apropriação do conhecimento.

2 – JUSTIFICATIVA

A atualização dos conteúdos abordados nas aulas de física se faz necessária para que os alunos possam ter contato com as novas teorias propostas pela ciência

³ Sistema de Posicionamento Global.

e, conseqüentemente, entender melhor o mundo que os cerca, rompendo a ideia de fragmentação do conhecimento físico – clássico e moderno desvinculados – e conduzindo-os a um processo de transformação histórico e contextualizado, na busca de respostas às questões e necessidades que surgem na sociedade. Uma vez que se abordam temas de FMC em sala de aula, dá-se a oportunidade para que o aluno entenda melhor vários aparatos tecnológicos de seu cotidiano.

Além disso, nacionalmente, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) já levantam o questionamento da inserção da Física Moderna em detrimento a outros tópicos como a Cinemática (Brasil, 2002, p. 60). Com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), os tópicos sobre teoria da relatividade estão contemplados na segunda competência específica de Ciências da Natureza e suas Tecnologias para o ensino médio, conforme se observa em Brasil (2018):

Analisar e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar e defender decisões éticas e responsáveis (BRASIL, 2018, p. 553).

Para a referida competência, são apresentadas algumas habilidades a seguir, por meio das quais fundamenta-se o estudo da teoria da relatividade:

(EM13CNT201) Analisar e discutir modelos, teorias e leis propostos em diferentes épocas e culturas para comparar distintas explicações sobre o surgimento e a evolução da Vida, da Terra e do Universo com as teorias científicas aceitas atualmente.

(EM13CNT204) Elaborar explicações, previsões e cálculos a respeito dos movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo com base na análise das interações gravitacionais, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como softwares de simulação e de realidade virtual, entre outros) (BRASIL, 2018, p. 557).

Ainda nesse contexto, a abordagem da teoria da relatividade também é proposta em documentos norteadores da educação no estado do Paraná. As Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física (DCE – Física), de 2008 – organizam os conhecimentos da Física em conteúdos estruturantes, a saber: movimento, termodinâmica e eletromagnetismo. A teoria da relatividade é citada no tópico sobre o eletromagnetismo sobre a importância da abordagem da Física Moderna, destacando a “imutabilidade da velocidade da luz, como um dos princípios da relatividade” (PARANÁ, 2008, p. 61). O mesmo documento ainda propõe, ao se estudar o conteúdo básico de gravitação (contemplado no conteúdo estruturante de

movimento), que o aluno “compreenda o contexto e os limites do modelo newtoniano, tendo em vista a Teoria da Relatividade Geral” (PARANÁ, 2008, p. 94).

Recentemente, o Referencial Curricular para o Ensino Médio do Paraná (2021) organizou o conhecimento da Física em cinco unidades temáticas, cada uma subdividida em objetos de conhecimento nas quais são, finalmente, apresentadas as sugestões de conteúdo. A unidade temática cinco, denominada Cosmologia, nomeia o objeto de conhecimento também com a mesma nomenclatura e apresenta como sugestão de conteúdo a teoria da relatividade geral (PARANÁ, 2021, p. 419), contemplando as habilidades EM13CNT201 e EM13CNT204 da BNCC (BRASIL, 2018).

Percebe-se assim, a importância de se pensar e produzir materiais com as propostas metodológicas adequadas para a abordagem de tópicos da teoria da relatividade, partindo-se de uma problematização, contextualizando-se os conteúdos conceituais, os aspectos históricos e as suas aplicações tecnológicas.

3 – OBJETIVOS

Nesta seção apresenta-se os objetivos geral e os específicos para nortear o que queremos atingir no final da aplicação do PE, estruturada considerando aspectos metodológicos didáticos-pedagógicos, e embasada e analisada considerando a teoria da aprendizagem significativa.

Objetivo geral

Abordar o efeito da curvatura do espaço-tempo da teoria da relatividade, com os alunos do 2º e do 3º ano do ensino médio, por meio de uma sequência didática, utilizando-se a história em quadrinhos como instrumento didático facilitador para a assimilação por parte dos alunos.

Objetivos específicos

Trazer a discussão e a contextualização da Teoria da Relatividade de Einstein junto aos alunos do 2º e do 3º ano do ensino médio, como uma resposta a problemas enfrentados pela Física clássica na virada para o século XX.

Apresentar como se transformam os paradigmas da ciência, estimulando a criatividade dos alunos e a superação do senso comum.

Produzir material de apoio a professores e alunos, com entendimento acessível, abordando a teoria da relatividade.

Utilizar a mídia de História em Quadrinhos (HQ) ou gibi, forma comumente chamada, como ferramenta pedagógica e estimuladora da imaginação dos alunos, levando a uma reflexão sobre a curvatura espaço-tempo na Teoria da Relatividade.

4 – METODOLOGIA

Para que o(a) aluno(a) consiga percorrer um itinerário que leve a um verdadeiro processo de apropriação do conhecimento, é necessário a utilização de atividades orientadas que envolvam técnicas e estratégias visando a sua concretização. O método adotado pelo(a) professor(a) será decisivo para que o(a) aluno(a), ao percorrer o itinerário da aprendizagem, passe de ouvinte passivo a alguém que consiga aprender com certa autonomia, preparando-o(a) não apenas para as eventuais avaliações ao término de cada etapa de estudos, mas sim, para continuar aprendendo a partir dos novos conhecimentos adquiridos.

Assim, no presente trabalho, adotou-se como referência de psicologia educacional a Teoria da Aprendizagem Significativa, proposta por David Ausubel e, como recurso metodológico, a organização de um Sequência Didática, proposta por Antoni Zabala, conforme passa-se a discorrer.

4.1 – TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

A aprendizagem pode ser apresentada como o fator principal a ser desenvolvido na relação docente e discente no ambiente escolar, fazendo com que estudiosos e pensadores busquem apresentar propostas e alternativas que visem à realização desse processo.

David Ausubel (1918-2008), psicólogo da educação, nascido nos Estados Unidos, desenvolveu uma teoria cognitiva denominada aprendizagem significativa. Ela tem como base o fato de que a aprendizagem ocorre quando uma nova informação é ancorada naquilo que o(a) aluno(a) possui de conhecimento prévio. Nas palavras do próprio autor, “o fator singular mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 137). Moreira (2014, p. 159) apresenta a teoria da aprendizagem significativa como cognitiva, que se dá pela forma organizada com que as informações são armazenadas na estrutura mental, que é chamada de estrutura cognitiva.

O conhecimento prévio – já possuído pelo aprendiz e que servirá como âncora para a aprendizagem – é nominado subsunçor e tende a ser potencializado por uma nova informação adquirida e assimilada. A nova informação, quando organizada e integrada, não apenas influenciando, mas modificando a estrutura cognitiva do aprendiz, proporciona a aprendizagem (MOREIRA, 2014, p. 160). O fruto da combinação entre o novo conhecimento e o já possuído pelo aprendiz resulta num terceiro conhecimento modificado.

Segundo Moreira e Masini (2001), o conceito de aprendizagem significativa pode ser resumido como:

um processo pelo qual uma nova informação se relaciona com um aspecto relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo. Ou seja, neste processo a nova informação interage com uma estrutura de conhecimento específica, qual Ausubel define como conceito subsunçor ou, simplesmente, subsunçor (*subsumer*), existente na estrutura cognitiva do indivíduo. A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em subsunçores relevantes preexistentes na estrutura cognitiva de quem aprende (MOREIRA e MASINI, 2001, p. 17).

Subsunçor corresponde aos conceitos presentes na estrutura cognitiva que funcionam para ancorar um novo conceito, uma “ponte cognitiva daquilo que já sabe com a nova informação” (RIBEIRO, SILVA, KOSCIANSKI, 2012, p. 168). Considerando a frequência das interações, ou das aprendizagens significativas, um subsunçor pouco desenvolvido vai se tornando mais abrangente e desenvolvido, aumentando o grau de elaboração dos conceitos, tornando-os mais inclusivos. A aprendizagem significativa é um processo em que um novo conhecimento é assimilado (ou ancorado) a outro já existente e relevante na estrutura cognitiva, onde é organizado, fazendo que um conceito específico vá se tornando mais abrangente (MOREIRA, 2014, p. 161). Ocorre, desse modo, o crescimento e a modificação

conceitual do subsunçor. O professor, ao identificar os conhecimentos prévios dos alunos, permite que esses subsunçores possam ser mais bem explorados.

É de fundamental importância que o professor consiga identificar os conhecimentos prévios dos alunos, a fim de que possam ser mais bem explorados. À medida que o aluno não apresentar algum subsunçor, será necessária uma primeira abordagem, buscando estabelecê-lo para que, na sequência, crie-se assimilações, “processo que ocorre quando um conceito ou proposição **a**, potencialmente significativo, é assimilado sob uma ideia ou conceito mais inclusivo, já existente na estrutura cognitiva” (MOREIRA, 2014, p.166). O maior número de assimilações tende a propiciar uma aprendizagem potencialmente significativa também maior.

Na ausência de subsunçores, devido à novidade do assunto ou caso se tenha perdido algum deles na estrutura cognitiva do estudante, é necessária a manipulação dessa estrutura a fim de “preencher o hiato entre aquilo que o aprendiz já conhece e o que precisa conhecer antes de poder aprender significativamente a tarefa com que se defronta” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 144). Para isso, utilizam-se os chamados organizadores prévios. Segundo Ribeiro, Silva e Koscianski (2012), quando o aluno carece de subsunçores,

sugere-se o uso de organizadores prévios, que são mecanismos pedagógicos auxiliares na ligação entre aquilo que o aprendiz já sabe e aquilo que irá adquirir. A justificativa para o uso dos organizadores prévios vem do fato de que as ideias existentes na estrutura cognitiva do aprendiz podem não ter a relevância e o conteúdo suficientes para estabelecerem ligações com as novas ideias introduzidas pelo material de instrução. Nesse caso, o organizador prévio faz o papel de mediador e também faz a alteração das ideias preexistentes, preparando-as para o estudo do material posterior (RIBEIRO, SILVA, KOSCIANSKI, 2012, p. 171).

Por meio de materiais apropriados, de conceitos com alto nível de abstração, generalizados e amplamente inclusivos, evoluem-se novos subsunçores que proporcionam futuras aprendizagens. Tais materiais, ditos potencialmente significativos, preparam a estrutura cognitiva do aluno com informações que possam estabelecer ligações das novas ideias aos conceitos apresentados.

Somando-se a utilização de materiais potencialmente significativos, outro fator de extrema importância está no fato de que “o aluno manifeste uma disposição para a aprendizagem significativa – ou seja, uma disposição para relacionar, de forma não arbitrária e substantiva, o novo material à sua estrutura cognitiva” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 34)

Cabe ao professor compreender a estrutura conceitual, considerando aquilo que é unificador, inclusivo, de maior explanação e integração e organizando tudo de tal forma que os conceitos mais abrangentes possam ser direcionados aos mais específicos. Da mesma forma, identificar na estrutura cognitiva quais subsunções relevantes já se encontram instaladas e auxiliar na assimilação e organização dos conceitos na estrutura cognitiva, vai servir para que o aprendiz tenha clareza nos significados ao mesmo tempo que sejam estáveis e transferíveis (MOREIRA, 2014, p.170).

4.2 – SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A escolha da utilização de uma Sequência Didática (SD) é justificada por permitir “o estudo e a avaliação sob uma perspectiva processual, que inclua as fases de planejamento, aplicação e avaliação” (ZABALA, 1998, p. 18).

Antoni Zabala ainda apresenta uma definição do que se trata uma sequência didática:

[...] buscando os elementos que as compõem, nos daremos conta que são um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos tanto pelo professor como pelos alunos (ZABALA, 1998, p. 18).

A SD se apresenta como uma proposta metodológica na qual atividades, ou seja, etapas da aula, são articuladas e ordenadas, formando uma unidade didática que maximize a aprendizagem do aluno, sempre atrelada ao conteúdo e visando aos objetivos propostos previamente num planejamento. Em outras palavras, é necessário saber exatamente/ter o objetivo do que se vai ensinar previamente determinado, como isso vai ocorrer e para quem será ensinado.

Vale destacar a diferença entre um plano de aula e uma SD, onde o primeiro trata daquilo que será desenvolvido em apenas uma aula e a SD visa desenvolver por completo uma unidade didática, podendo assim, utilizar mais de uma aula para atingir seus objetivos.

Cada unidade didática deve articular as etapas de elaboração metodológica durante a aula, considerando uma maior ou menor participação dos estudantes. Dessa forma, a metodologia adotada pelo professor contribui para uma postura mais

ativa ou passiva por parte dos alunos. O número e a variedade das atividades favorecem o deslocamento do protagonismo do professor para o aluno.

Quanto aos conteúdos que serão contemplados em uma unidade didática, Zabala (1998, p. 39) propõem sua organização para além da classificação tradicional de componentes curriculares ou áreas (Matemática, Geografia, Ciências, Línguas...), considerando suas tipologias, assim classificados como conteúdos: factuais, conceituais, procedimentais e atitudinais. Tais conteúdos são organizados da seguinte forma:

- Conteúdos Factuais

Entende o conhecimento de fatos, acontecimentos, situações, dados e fenômenos concretos e singulares: a idade de uma pessoa, a conquista de um território, a localização ou a altura de uma montanha, os nomes, os códigos, os axiomas, um fato determinado num determinado momento (ZABALA, 1998, p. 41).

Percebe-se que todos os elementos de aprendizagem são concretos e que podem ser problematizados por meio de um texto, um vídeo, uma imagem, um quadrinho, que auxiliem na memorização e futura repetição por parte do aluno. Expressar e reproduzir de forma mais exata possível é sinônimo de êxito na aprendizagem de um conteúdo factual, o que é possível por meio de exercícios de repetição.

- Conteúdos Conceituais e Princípios

Os conceitos se referem ao conjunto de fatos, objetos ou símbolos que têm características comuns, e os princípios se referem às mudanças que se produzem num fato, objeto ou situação em relação a outros fatos, objetos ou situações e normalmente descrevem relações de causa-efeito ou de correlação (ZABALA, 1998, p. 42).

Ao contrário dos conteúdos factuais, os conceituais tratam de aspectos mais abstratos, uma vez que se faz necessário o entendimento de um significado. Como princípios, os conteúdos não se encerram, estes se relacionam e se completam permitindo a ampliação e o aprofundamento. Os conteúdos se tornam mais significativos à medida que se aumenta a compreensão do estudante.

- Conteúdos Procedimentais

Inclui entre outras coisas as regras, as técnicas, os métodos, as destrezas ou habilidades, as estratégias, os procedimentos – é um conjunto de ações

ordenadas e com um fim, quer dizer, dirigidas para a realização de um objetivo. São conteúdos procedimentais: ler, desenhar, observar, calcular, classificar, traduzir, recortar, saltar, inferir, espetar (ZABALA, 1998, p. 43).

Ao se colocar em prática os conhecimentos oriundos dos conteúdos conceituais, o aluno é direcionado à realização dos objetivos. Os conteúdos procedimentais consistem, então, nas ações ordenadas para que os objetivos se concretizem, por intermédio da prática repetitiva até se ter domínio dos processos e saiba resolver os problemas.

- Conteúdos Atitudinais

Engloba uma série de conteúdos que por sua vez podemos agrupar em valores, atitudes e normas. Cada um destes grupos tem uma natureza suficientemente diferenciada que necessitará, em dado momento, de uma aproximação específica (ZABALA, 1998, p. 41).

As explicações teóricas cedem espaço às práticas de vivência de ajuda, de cooperação, de respeito. Envolvem a conduta do aluno diante do outro e à natureza, uma atitude de refletir quanto às decisões, ao discernimento, ao posicionamento, ao envolvimento afetivo e à avaliação da própria conduta.

Em relação a uma proposta estrutural de SD utilizou-se a apresentada e discutida no trabalho de Araújo (2013, p. 323) que é a proposta por Dolz, Novarraz e Schneuwly (2004). Nela, a SD é apresentada em quatro etapas ou passos: apresentação da situação; produção inicial; módulos de atividades e produção final.

4.3 – HISTÓRIAS EM QUADRINHOS COMO INSTRUMENTO DE ENSINO

Desde os tempos mais remotos, a humanidade utiliza-se de desenhos, representações de animais, plantas e outros elementos da natureza para se comunicar. Os antigos desenhos em cavernas eram bem mais que rabiscos em paredes; eram também uma forma de transmissão e acumulação de conhecimentos. Nas crianças, a primeira forma de expressão de sentimentos se dá por rabiscos de imagens que expressam a forma com que elas percebem e se comunicam com o mundo. Pode-se dizer, então, que “as histórias em quadrinhos vão ao encontro das necessidades do ser humano, na medida em que utilizam fartamente um elemento de comunicação que esteve presente na história da humanidade desde os primórdios: a imagem gráfica” (VERGUEIRO, 2020, p.8).

O advento da imprensa, os avanços da indústria tipográfica, o surgimento de grandes grupos jornalísticos impressos são fatores que, segundo Vergueiro (2020, p. 10), contribuem para que as Histórias em Quadrinhos (HQs) se tornem cada vez mais comuns à grande massa da população, com temáticas variando entre aventura, terror, suspense, entre outros. No Brasil, os periódicos de HQs recebem o nome de gibis.

Após a Segunda Guerra Mundial, as HQs passam a ser questionadas quanto aos males que poderiam apresentar às crianças e aos adolescentes. Procurou-se provar, por meio da Psiquiatria, que crianças poderiam apresentar comprometimento em seu comportamento por lerem HQs. No final da década de 1940, é criado o Código de Ética dos Quadrinhos pelos editores norte-americanos.

Inicialmente, as HQs não foram acolhidas por pensadores e intelectuais, o que limitava sua aceitação enquanto expressão de linguagem e impossibilitava sua utilização voltada à educação. O final do século XX traz consigo uma mudança na perspectiva, não apenas da leitura de HQs como também de sua utilização em ambiente educacional. As HQs passam a ser vistas mais amigavelmente “recebendo um pouco mais de atenção das elites intelectuais e passando a ser aceitas como um elemento de destaque global de comunicação e como uma forma de manifestação artística com características próprias” (VERGUEIRO, 2020, p. 17).

A partir dos anos de 1990, no Brasil, passa-se a utilizar com mais frequência HQs vinculadas à educação, tornando-se comum encontrá-las nas páginas de livros didáticos e materiais paradidáticos. A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) (BRASIL, 2018), apresenta várias citações referentes à utilização de HQs, tirinhas e outros elementos de comunicação textual e gráfica como instrumentos para auxiliar o processo de aprendizagem, em especial, a leitura. A facilidade de compreensão dos textos aliada a ilustrações que instigam a imaginação tende a despertar o interesse pela leitura e a busca de outras fontes literárias. Segundo a BNCC (BRASIL, 2018),

o grau de envolvimento com uma personagem ou um universo ficcional, em função da leitura de livros e HQs anteriores, da vivência com filmes e games relacionados, da participação em comunidades de fãs etc., pode ser tamanho que encoraje a leitura de trechos de maior extensão e complexidade lexical ou sintática dos que os em geral lidos (BRASIL, 2018, p. 76).

O envolvimento, o desenvolvimento e o gosto pela leitura podem encontrar nas HQs sua porta de acesso. Graças aos elementos gráficos, as HQs podem constituir uma ferramenta importante na alfabetização de crianças ao associarem as imagens e situações aos textos presentes nos balões de diálogos. Paralelo a isso, pedir para

uma criança representar seus pensamentos e sentimentos por meio de um desenho é uma maneira de estimular sua imaginação. Santos (2001) converge para o mesmo pensamento ao afirmar que “a utilização de quadrinhos pode ser de grande valia para iniciar o jovem no caminho que leva à consolidação do hábito e do prazer de ler” (SANTOS, 2001, p. 47). Pode-se, ainda, constatar que “o gibi é o primeiro livro de leitura de uma criança” (LOVETRO, 1995, p. 95).

As HQs não devem ser consideradas apenas como meio de entretenimento e não necessariamente estarem atreladas a temáticas fictícias e fantasiosas. Podem apresentar roteiros históricos e autobiográficos e mesmo, quando ficção, é possível a abordagem de temas sociais e culturais relevantes. Uma HQ, mesmo que não seja “uma reconstituição dos fatos à qual se refere, tal como aconteceram, mas a sua recriação, do modo como são lembrados pelo autor; ou mesmo, como ele gostaria que fossem registrados para a posteridade” (VILELA, 2020, p. 116).

Sobre a utilização de HQs em ambiente escolar, Vergueiro (2020, p. 21) apresenta vários motivos que justificam sua utilização como ferramenta de auxílio na aprendizagem. O primeiro ponto relevante é a popularidade deste tipo de leitura entre crianças e adolescentes, o que potencializa a motivação “aguçando sua curiosidade e desafiando seu senso crítico” (VERGUEIRO, 2020, p. 21). A combinação de imagens e textos contribuem para que se ampliem o nível da comunicação, o que melhora a aprendizagem. Como as HQs permitem a abordagem de temas que vão desde o humor a temas históricos, à ficção científica, entre outros, torna-se alto o nível de informações possíveis de se trabalhar. O enriquecimento das possibilidades de comunicação presentes nas HQs contribui para que o hábito da leitura se torne rotineiro entre os estudantes, ao mesmo tempo que enriquece seu vocabulário.

4.4 – RECURSOS

Para a problematização e início do debate sobre o fenômeno da curvatura espaço-tempo, será apresentado um recorte de matéria de jornal referente à observação do eclipse solar na cidade de Sobral, no Ceará, em 29 de maio de 1919, primeira comprovação experimental das teorias de Einstein quanto à deformação do espaço-tempo.

A proposta é que a apresentação seja feita aos alunos por meio de um roteiro de uma história em quadrinhos (HQ), abordando desde o impasse entre a mecânica

newtoniana e as leis do eletromagnetismo, passando pela proposta de Einstein para solucionar o problema, levando como consequência, à ideia de curvatura do espaço-tempo.

Aproveitando o fato de que as salas de aula dos colégios estaduais do Paraná contam, em sua maioria, com TV Multimídia e alguns projetores na escola, serão selecionados alguns pequenos vídeos, visando contribuir para a melhor assimilação dos conceitos apresentados.

Outra proposta é a utilização de simuladores *online*, de uso livre, para experimentação virtual sobre a contração do espaço e a dilatação do tempo. Será utilizado no *site* Walter Fendt um simulador⁴ e uma calculadora⁵ para analisar e calcular a dilatação do tempo. Serão utilizadas outras propostas em aparelhos de *Smartphones* (*Physics at school* e T.E. Relatividade – aplicativos disponíveis gratuitamente na *Play Store*).

A ideia é despertar a sadia confusão na mentalidade dos alunos sobre a realidade da dilatação do tempo e a contração do espaço e, também, esclarecê-la.

Com o auxílio de vídeos selecionados no canal do YouTube^{BR}, pode-se fazer o resgate dos organizadores prévios necessários aos alunos, quando detectado que não apresentem subsunçores, como também reforçar conceitos e quantificar algumas grandezas abordadas durante as aulas.

4.5 – AVALIAÇÃO

Zabala (1998) apresenta a avaliação não apenas como um momento de quantificação (denominada de somativa) dos conteúdos assimilados ou decorados pelos alunos. A avaliação é apresentada como um processo em que não só o aluno é avaliado, mas também o professor e sua metodologia. Assim, “podemos distinguir claramente dois processos avaliáveis: como o aluno aprende e como o professor ou professora ensina” (ZABALA, 1998, p. 196).

Dessa forma, a avaliação será desenvolvida de forma processual, a cada aula, por meio de questões preestabelecidas pelo professor, sejam questões de pesquisa ou aquelas que já foram aplicadas em exames vestibulares, como também atividades

⁴ <https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm>

⁵ <https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm>

desenvolvidas pelos(as) próprios alunos(as), com as quais serão incentivadas atividades de caráter lúdico, como palavras cruzadas e desenhos. Durante as atividades, serão analisadas a relação do(a) aluno(a) em relação aos conceitos, procedimentos e atitudes.

Por fim, haverá a aplicação do questionário avaliativo proposto pelo professor, visando observar a apropriação dos conhecimentos pelos alunos.

5 – ORGANIZAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A SD terá as unidades organizadas e articuladas, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Cronograma de organização e encaminhamento da sequência didática.

ENCONTROS	UNIDADES DIDÁTICAS	CONTEÚDOS	OBJETIVOS	RECURSOS
1 (100 min)	01 (50 min)	-Aplicação do questionário para abordagem de conhecimentos prévios; apresentação do tema - problematização (eclipse de Sobral).	-Aplicar questionário para avaliação formativa inicial. -Introduzir e problematizar o tema sobre a teoria da relatividade.	-Folha de questionário e primeira parte da história em quadrinhos (HQ).
	02 (50 min)	-Eletromagnetismo x Física clássica.	-Desenvolver com os estudantes a ideia de mudança de referencial na mecânica clássica. -Discutir o problema da mudança de referencial para eventos eletromagnéticos. -Definir o significado de relativo, absoluto e referencial.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio.
2 (100 min)	03 (50 min)	-Postulados da teoria da relatividade.	-Definir o que é um postulado. -Tornar conhecidos os postulados da teoria da relatividade restrita. -Discutir as	-HQ; projeção de imagens ilustrativas; vídeo ilustrativo; texto de apoio. -Exercício quantitativo.

			implicações dos postulados.	
	04 (50 min)	-Dilatação do tempo e contração do espaço – física e tecnologia: GPS.	-Discutir com os alunos os fenômenos da dilatação temporal e contração espacial, assim como podemos verificar sua veracidade. -Entender como se aplica a dilatação temporal no funcionamento de um GPS.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio; -Simulador.
3 (100 min)	05 (50 min)	-Paradoxo dos gêmeos – resolução de exercícios.	-Apresentar o problema do paradoxo dos gêmeos como um exercício mental da teoria da relatividade restrita. -Aplicar a dilatação temporal como uma forma de entender as partículas múons que atingem a superfície da Terra.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio. -Lista de exercícios de vestibulares.
	06 (50 min)	-Teoria da relatividade geral – Princípio da equivalência.	-Debater com os alunos a relação entre aceleração e campo gravitacional. -Desenvolver a autonomia dos alunos quanto aos conhecimentos adquiridos.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; vídeo; texto de apoio. -Elaboração de exercícios de fixação pelos alunos.
4 (100 min)	07 (50 min)	-Teoria da relatividade geral – Curvatura do espaço-tempo. -Questionário avaliativo.	- Definir a curvatura do espaço-tempo como uma consequência do princípio da equivalência. - Entender como a trajetória da luz acompanha a deformação do espaço-tempo.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; folha de questionário avaliativo.
	08 (50 min)	-Análise dos resultados obtidos	-Realizar análise das respostas	-Questionário avaliativo.

		no questionário e avaliação da sequência didática.	apresentadas pelos alunos. -Avaliação da sequência didática.	
--	--	--	--	--

Fonte: o autor.

6 – UNIDADES DIDÁTICAS

Olá, querido(a) estudante! Iremos realizar pelas próximas páginas um pequeno passeio buscando conhecer um pouco sobre a teoria da relatividade proposta por Albert Einstein. Para isso, teremos a companhia de três cachorrinhos com personalidades bem diferentes, que irão auxiliar em nossa aventura pelo conhecimento.



Duque: um Vira-lata grandão e simpático, amigo e muito curioso, que apesar de não conhecer muito de ciências, adora aprender coisas novas.

Ben: um Spitz Alemão (Lulu da Pomerânia) impicante, ranheta e que adora questionar tudo. Apesar do gênio forte é um grande amigo e está sempre presente.



Bob: um Schnauzer muito carinhoso, amigo e que adora observar e aprender. Sempre partilha seus conhecimentos com os amigos e deseja que todos aprendam mais.

Os cachorrinhos são baseados em *pets* reais (Figura 2.1), e foram selecionados de acordo como o comportamento deles. Dos três, atualmente somente o Ben está entre nós.

O desenho e a utilização das caricaturas das pessoas foram autorizadas por elas.

Qualquer semelhança de nomes e situações foi mera coincidência.

Aproveitem o passeio pelo mundo fascinante da teoria da relatividade, divirtam-se e que ao final, consigam compreender as bases desta desafiadora teoria.

Figura 1 – Apresentação dos *pets*: (a) Duque, (b) Bob, (c) Ben.



Fonte: arquivos do autor.

UNIDADE DIDÁTICA 1

QUESTIONÁRIO DIAGNÓSTICO E APRESENTAÇÃO DO TEMA

Papel do professor

Com a realização do questionário diagnóstico, coletar informações sobre o conhecimento prévio dos alunos a respeito da teoria da relatividade e no que ela se difere da teoria clássica de Newton, ao mesmo tempo, o questionário tende a instigar a curiosidade dos alunos à medida que respondem as questões propostas.

O que se espera

Que ao preencher o questionário o aluno já inicie o processo de reflexão sobre os elementos que diferenciam a teoria da relatividade e a teoria clássica.

Que partindo de um fato histórico, o eclipse ocorrido na cidade cearense de Sobral em 1919, os alunos já comecem a assimilar a teoria da relatividade a eventos da natureza.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Apresenta-se aos alunos o questionário diagnóstico ao mesmo tempo que são motivados a responder de forma mais sincera e objetiva possível, sem a preocupação com erro ou acerto. Lembrando que o questionário não possui caráter avaliativo, e sim, contribui como ferramenta visando resgatar o conhecimento que os alunos já possuem sobre o assunto, ou seja, os subsunçores.

Atividade 2 – Realiza-se a leitura individual da primeira parte da HQ, em que é apresentada a cópia de um artigo original de jornal referente ao evento de Sobral, o eclipse de 1919.

Atividade 3 – São propostas algumas questões para reflexão sobre a HQ.

Atividade 4 – Realiza-se a leitura coletiva do texto de apoio e apresenta-se a foto e ilustrações que representam o evento observado.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 1.

Atividade 1 – Questionário para diagnóstico formativa inicial (20 min.)

O questionário contendo oito questões dissertativas, que apresentamos a seguir, com as respostas esperadas.

1 – Desprezando a resistência do ar e considerando que uma bola de boliche e uma maçã são abandonadas da mesma altura, quem chega ao chão primeiro?

Ambas chegam ao mesmo tempo.

2 – O que você compreende quando se diz que algo é “relativo” ou “absoluto”?

Relativo: quando alguma coisa depende de outra. Necessita de condições e/ou informações iniciais.

Absoluta: quando alguma coisa não depende ou não está relacionada a outra, tem autonomia. Não necessita de condições iniciais.

3 – O que você conhece a respeito da teoria da relatividade de Einstein?

- Relatividade Restrita: mudança no entendimento dos movimentos. A velocidade da luz é considerada absoluta enquanto o espaço e o tempo são considerados relativos para observadores em referenciais inerciais diferentes.

- Relatividade Geral: considera a gravidade não como uma força de interação à distância, mas sim, uma deformação do tecido espaço-tempo na presença de corpo com grande massa. Considere a efeitos da aceleração e de um campo gravitacional com equivalentes.

4 – Qual a diferença entre a física clássica de Newton e a teoria da relatividade de Einstein?

- Newton: trata do movimento de objetos com velocidades pequenas quando comparadas com a velocidade da luz. Valores de velocidades na ordem de grandeza que conseguimos medir e observar. A velocidade é uma grandeza relativa enquanto o tempo e espaço são absolutos.

- Einstein: trata de movimentos próximos da velocidade da luz. A velocidade da luz é considerada uma grandeza absoluta e o espaço e tempo são considerados como grandezas relativas. Dá um novo entendimento a gravidade.

5 – Você já ouviu falar sobre a dilatação do tempo e contração do espaço, ou do paradoxo dos gêmeos? Se sim para algo, o que?

- Dilatação do tempo: a tempo passa mais lentamente para referenciais em movimento em relação a outro referencial em repouso.

- Contração do espaço: as dimensões de um corpo em um referencial em movimento apresentam medias menores para um observador em outro referencial em repouso.

- Paradoxo dos gêmeos: experimento mental que aborda a dilatação do tempo.

6 – Qual a trajetória mais provável para o movimento de um feixe de luz.

Linha reta.

7 – O que você sabe sobre Buraco Negro?

É uma deformação muito grande do espaço-tempo causada por um objeto muito denso, que nem mesmo a luz consegue escapar de sua interação gravitacional.

8 – Você é capaz de citar alguma aplicação cotidiana da teoria da relatividade?

Aparelho ou aplicativo de GPS.

Os resultados serão compilados logo após a aula e servirão como base para os devidos encaminhamentos das atividades e quando necessário, auxiliará o professor na revisão das estratégias em estabelecer organizadores prévios junto aos alunos.

A seguir, trabalhar com a primeira página da HQ, conforme apresentada na Figura 3. Nessa página está colocada a problematização pelo Duque por meio de um recorte de jornal que encontrou nas “coisas dos humanos” (uma inversão de papéis para tornar mais lúdica e semelhante às HQs tipo gibis). Ele é muito curioso. E trás para discutir o assunto com o Bob, que é o sabichão. No meio da conversa chega o Ben (Benjamin) que é ranzinza e duvida de tudo.

Nesse recorte (cópia do original) trata do eclipse ocorrido em Sobral no ano de 1919, cuja comitiva (Figura 2) liderada pelos ingleses Andrew Crommelin e Charles Davidson, comprovaram pela primeira vez a teoria do famoso físico Albert Einstein. Normalmente os alunos conhecem a fama de Einstein por ser um grande físico, mas, não compreendem realmente a sua contribuição com a ciência e o que isso tema ver com os dias de hoje.

O recorte foi transcrito na parte inferior da página, pois a cópia não está tão nítida. A grafia era a da época.

Figura 2 – Cópia da fotografia dos participantes da expedição de Sobral.



Fonte: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/10/historia-do-eclipse-de-sobral-ce-que-comprovou-teoria-da-relatividade.html>. Acesso em 17/04/22.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 1 (Figura 3)

Figura 3 – Primeira página da HQ – Aula 1: o eclipse de Sobral em 1919 (problematização).

Aula 1

O eclipse de Sobral em 1919



Fonte: o autor.

O ECLYPSE SOLAR DE MAIO E OS SCIENTISTAS – Londres, 8 (H.)

Os resultados obtidos pela missão que foi ao Ceará e a Ilha do Príncipe observar o eclipse solar de Maio último estão causando o mais vivo interesse nos círculos científicos, porque esses resultados vêm confirmar uma lei de deflexão do professor suíço Einstein, cujas novas theories sobre o universo não admitem as leis de Newton⁶.

⁶ Reportagem “Há 100 anos, eclipse em Sobral pôs Einstein e Teoria da Relatividade na História” de 25/05/2019 – Jornal Estadão. Disponível em:

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 1

Após a leitura da HQ, questionar os alunos sobre os seguintes aspectos:

- a) Qual foi o seu entendimento geral?
- b) Ficou claro o texto do jornal apresentado pelo Duque e qual foi a dúvida que lhe surgiu?
- c) Quais outros pontos que não tenham ficado claros durante a leitura da HQ?

Atividade 4 – Leitura do Material de apoio: O eclipse de Sobral

Texto para os alunos: O eclipse de Sobral

Nos anos de 1905 e 1915, Albert Einstein publicou dois artigos que tratavam, respectivamente, da teoria da relatividade restrita e da teoria da relatividade geral. Suas ideias não foram de pronto entendidas e aceitas pela comunidade científica. Muitas dúvidas cercavam a nova teoria que contrariava o que já era conhecido e aceito pela física newtoniana a respeito do espaço, tempo e gravidade. Além disso, um dos fatores que não colaboravam com sua aceitação estava na dificuldade de realizar demonstrações experimentais.

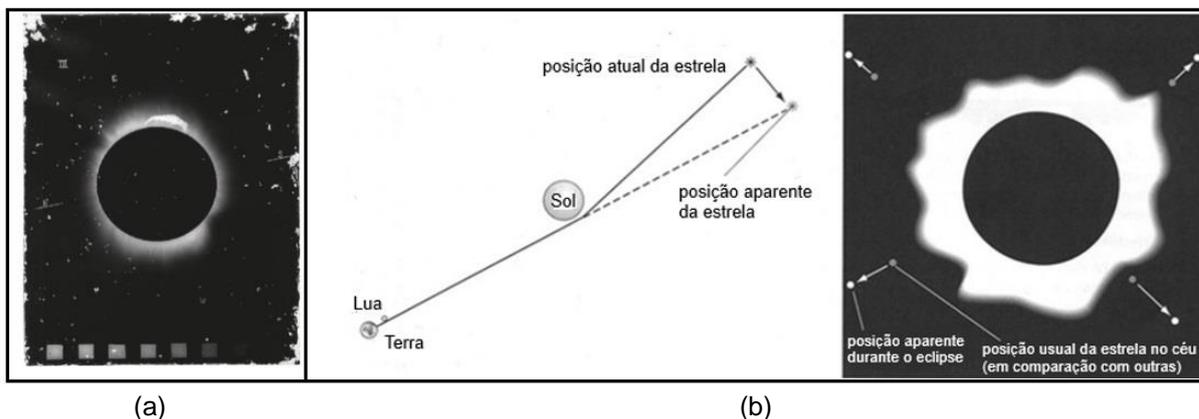
A teoria da relatividade geral apresentava uma nova compreensão para os efeitos da gravidade. Enquanto a teoria clássica de Newton atribuía à gravidade uma interação inversa ao quadrado da distância entre massas, Einstein propunha que a gravidade seria o efeito da deformação do espaço-tempo na presença de uma grande massa (o Sol, por exemplo). A luz, do ponto de vista clássico, por ser composta por partículas (fótons), que não possuem massa, percorreria sempre uma trajetória retilínea, não sendo influenciada pela ação da gravidade e no contexto da teoria da relatividade, a trajetória da luz acompanharia a deformação do espaço-tempo provocado pela presença de um astro massivo.

Em maio de 1919, duas expedições de cientistas ingleses se deslocaram, uma para a cidade de Sobral no Brasil, outra para a Ilha do Príncipe, na África Continental, para a realização de observações de um eclipse que permitiria visualizar estrelas durante os minutos que o Sol estivesse encoberto. O resultado obtido pela expedição que estava na África foi comprometido devido ao céu estar nublado. A equipe que

<https://img.estadao.com.br/thumbs/640/resources/jpg/2/7/1559067116972.jpg>. Acesso em 13/04/2022. A tradução possui a ortografia da época.

esteve presente em Sobral, no dia 29 de maio, conseguiu fotografar o eclipse e, conseqüentemente, várias estrelas em torno do Sol (Figura 4). Análises posteriores mostraram que as posições das estrelas nas fotos apresentavam desvios de suas reais posições. Os cálculos do desvio sofrido na trajetória da luz estavam de acordo com as estimativas da teoria da relatividade geral de Einstein.

Figura 4 – (a) Foto do eclipse de Sobral em 1919. (b) Esquema do desvio sofrido pela luz nas proximidades do Sol.



Fonte: (a) <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/3cQFXzYr5Fs8V7yKMVtzgQc/?lang=pt#ModalFig04>
(b) <https://www.scielo.br/j/rbef/a/7xnCndqcq78pSNZzpbkvfRr/?lang=pt#ModalFig1> (créditos: Arthur Eddington). Tradução do autor. Acesso em 07/04/2022.

Atividades de fechamento da aula

Para a primeira aula não será apresentada nenhuma atividade, pois os alunos já preencheram o questionário para avaliação formativa inicial. Sugere-se que todos assistam ao vídeo 1 da lista de materiais complementares.

Materiais complementares

Os materiais complementares, disponíveis em cada unidade didática, têm por objetivo ser uma fonte de pesquisas complementar para professores e alunos. São textos e vídeos referentes a cada assunto abordado durante as aulas. O fato das várias indicações se justificam por apresentar mais de uma forma de se tratar os temas, como também, uma garantia caso algum *link* não esteja mais disponível para acesso.

- VÍDEO 1 – “Eclipse de Sobral: O dia em que o Brasil ajudou a confirmar a teoria da relatividade de Einstein” - YouTube. Duração: 9min26s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 31/05/2022.

- VÍDEO 2 – “5 Coisas sobre a Teoria da Relatividade - 100 anos de Sobral” - YouTube. Duração: 15min39s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 02/06/2022.

- TEXTO 1 – “O eclipse de Sobral: como a Teoria da Relatividade foi comprovada no Ceará” – Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/o-eclipse-de-sobral-como-a-teoria-da-relatividade-foi-comprovada-no-ceara/>>. Acesso em 01/06/2022.

- TEXTO 2 – “O episódio histórico do centenário do eclipse de Sobral e suas implicações para o Ensino de Física por meio da divulgação científica” – Disponível em: <<https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/educarmais/article/view/1800/1477>>. Acesso em 02/06/2022.

Referências

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

PIATTELLA, Oliver. F. Introdução à relatividade geral. **Cadernos de Astronomia**, Vitória, v. 1, n. 1, p. 30–39, 2020. DOI: 10.47083/Cad.Astro.v1n1.30827. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrologia/article/view/30827>. Acesso em: 2 maio de 2023.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 2

ELETROMAGNETISMO X MECÂNICA CLÁSSICA

Papel do professor

Instigar a reflexão dos alunos aos conceitos de repouso, movimento e movimento relativo, segundo a teoria da mecânica clássica.

Apresentar o problema gerado pela teoria eletromagnética em relação à teoria da mecânica clássica no final do século XIX, de acordo com as referências de Menezes (2005).

O que se espera

Após a aula, que os alunos tenham clareza em relação aos conceitos sobre referencial, movimento, velocidade e que entendam de forma satisfatória o conceito de absoluto e relativo em um movimento e realizem operações matemáticas envolvendo as transformações de Galileu.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Realiza-se um breve resgate da primeira aula e na sequência é apresentado o tema da segunda aula.

Atividade 2 – Leitura individual da HQ referente a segunda aula.

Atividade 3 – Questionamento e discussão sobre o que os alunos entenderam, o que foi novidade e o que ainda é dúvida após a leitura.

Atividade 4 – Leitura coletiva do texto de apoio para os alunos seguido de comentários.

Atividade 5 – Pesquisa na *internet* por meio do *smartphone* sobre o significado das palavras relativo, absoluto e referencial.

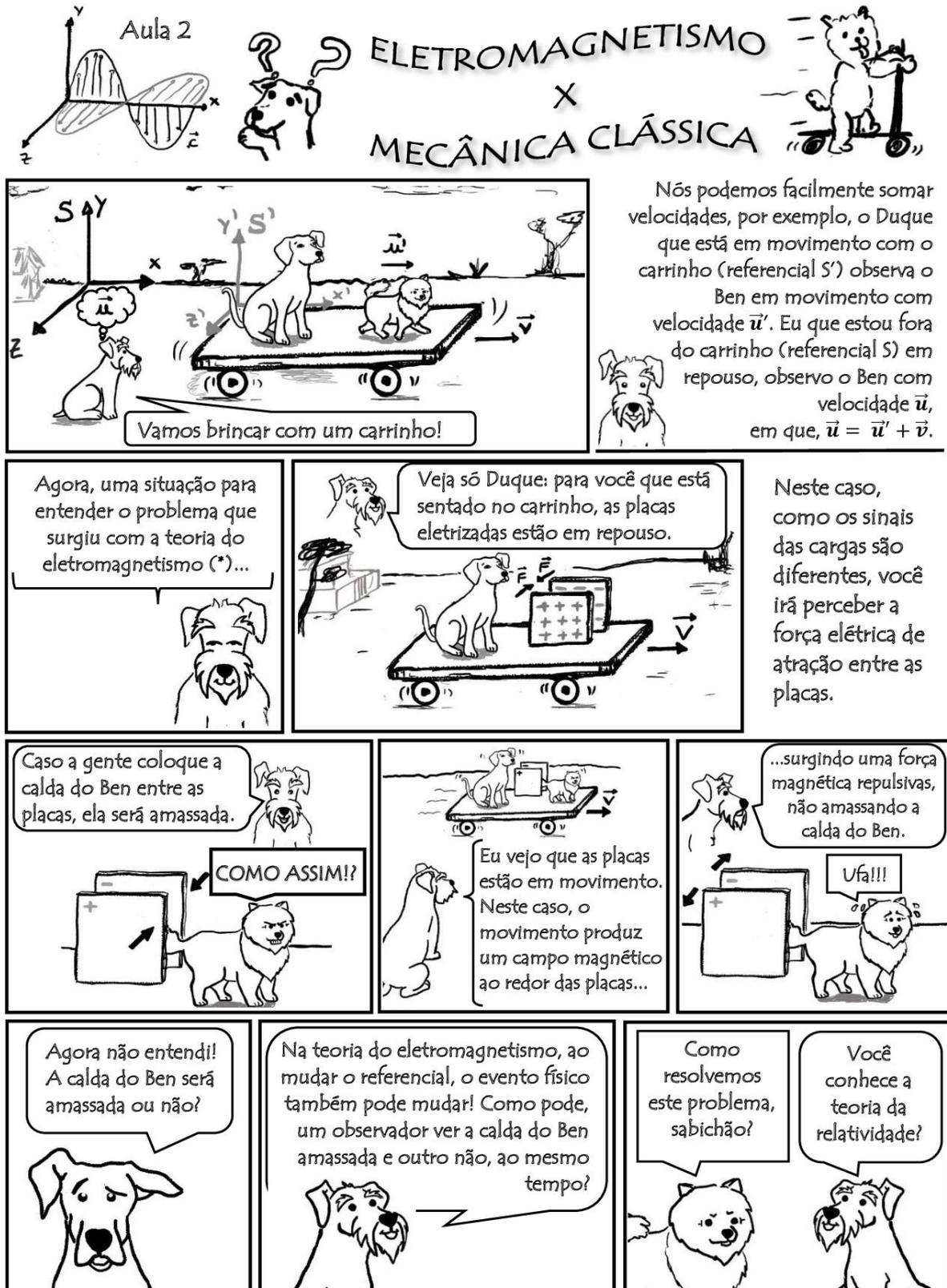
Atividade 6 – Resolução de exercícios envolvendo as transformações de Galileu.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 2.

Após revisar o conteúdo como proposto na Atividade 1, passa-se na sequência a leitura individual da segunda página da HQ (Figura 5). O seu conteúdo é importante, pois nele apresenta-se os aspectos físicos da teoria que previa a velocidade relativa e repouso entre corpos na mecânica newtoniana e o que ocorre com o advento do eletromagnetismo. Essa análise é importante para introduzir a relatividade restrita.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 2 (Figura 5)

Figura 5 – Segunda página da HQ – Aula 2: eletromagnetismo x mecânica clássica.



Fonte: o autor.

(*) Adaptação do autor, da exemplificação feita por Luis Carlos de Menezes em forma de texto, no livro "A matéria, uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento física" (Editora Livraria da Física, 2005, p. 120).

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 2

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: Referencial e movimento

Texto para os alunos: Referencial e movimento

Um evento físico é algo que pode ser analisado e mensurado por suas informações de espaço e tempo. A análise pode ser realizada por observadores que se encontram em referenciais distintos, ou seja, possuem pontos de vista diferentes, sem, entretanto, mudar o evento.

Por referenciais inerciais definimos os sistemas de coordenadas que estão em repouso ou em movimento em linha reta com velocidade constante, um em relação ao outro.

A mecânica newtoniana utiliza um conjunto de equações denominadas transformações de Galileu para encontrar os valores das grandezas físicas em referenciais inerciais distintos. Considerando dois referenciais espaciais cartesianos (x, y e z) e a temporal (t), um S em repouso e outro S' com velocidade constante em relação ao primeiro, o movimento apenas na coordenada x pode ser descrito da seguinte maneira:

$$x' = x - v \cdot t; \quad (2.1a)$$

$$y' = y; \quad (2.1b)$$

$$z' = z; \quad (2.1c)$$

$$t' = t, \quad (2.1d)$$

como ilustrado no primeiro quadro da página da HQ da Aula 2.

Da mesma forma, é possível uma transformação entre os valores das velocidades relativas para observadores em ambos os referenciais:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v} \quad (2.2a)$$

ou,

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}. \quad (2.2b)$$

Todo evento físico é analisado e entendido a partir de referenciais que se adotam para mensurar suas variáveis. Ao estudar o movimento dos corpos deve-se ter em

mente as noções de espaço, tempo e a massa do objeto que se move. Da mesma forma, o evento físico observado deve manter uma coerência para referenciais diferentes. Não se pode mudar o evento físico em si, apenas pelo fato de ser analisado por outro referencial.

A teoria do eletromagnetismo de Maxwell, aliada aos resultados experimentais de Michelson e Morley, mostrava que a velocidade da luz não seguia a regras da física newtoniana. O valor da velocidade da luz se mantém constante para todos os observadores, em todos os referenciais, independentemente do movimento da fonte, podendo acontecer que um evento físico seja percebido de formas diferentes em referenciais também diferentes.

Assim, a teoria da relatividade proposta por Einstein apresenta uma solução para os conflitos entre a teoria newtoniana e o eletromagnetismo. O impasse entre a calda do Ben ser ou não amassada, é retomado na Figura 6, um quadrinho extra.

Figura 6 – Quadrinho extra sobre o impasse da calda do Ben ser amassada ou não, apresentado na HQ da Aula 2.



Fonte: o autor. (*) Na unidade didática 4, aguarde as cenas dos próximos capítulos.

Atividade 5 – Fechamento da aula: pesquisa a ser realizada por meio de *smartphone* e resoluções de questões

Chegou o momento de realizarmos algumas atividades para testarmos os conhecimentos adquiridos.

1) Realize uma pesquisa *online* sobre o significado das seguintes palavras:

- **Absoluto:** Que subsiste por si próprio; independente, autônomo; que não tem limites ou que não sofre restrição; ilimitado, irrestrito; que não se submete a condição; incondicional⁷.

- **Relativo:** Que depende de certas condições; que depende de outro; que não pode ser afirmado sem reserva; que não é absoluto.

- **Referencial:** que contém referência; que constitui ou é utilizado como referência; (fis.): Diz-se de ou sistema de coordenadas espaciais e temporais, pelo qual é possível realizar a observação de fenômenos físicos, assim como sua descrição e a formulação de suas leis.

2) A velocidade de um objeto em movimento pode apresentar valores distintos para observadores diferentes. O que determina essa diferença de velocidade para os vários observadores?

A utilização de referenciais diferentes.

3) No primeiro quadro da historinha de hoje, considere a velocidade do Ben observada pelo Bob com o módulo de 4 m/s, ao mesmo tempo em que o Duque observa o Ben com velocidade 2,5 m/s. Qual será a velocidade do carrinho?

u' = velocidade do Ben, observada pelo Duque = 2,5 m/s

u = velocidade do Bem, observada no referencial do Bob = 4 m/s

v = velocidade do carrinho = ?

Utilizando-se da equação 2.2b, temos:

$$u = u' + v$$

$$v = u - u'$$

$$v = 4 - 2,5$$

$$v = 1,5 \frac{m}{s}$$

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “O Conflito com a Mecânica Clássica” (livro digital) – Disponível em: <<https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504254>>. Acesso em: 19/07/2022.

- TEXTO 2 – “Introdução a Teoria da Relatividade” - Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4394955/mod_resource/content/0/Intro-Relatividade_SRM__EFC-2015_v3.pdf>. Acesso em: 19/07/2022.

Referências

⁷ Escritos em azul, o significado encontrado na versão online do dicionário Michaelis, disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/>

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Ótica e Física Moderna**. v. 4, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

MENEZES, Luiz Carlos de. **A Matéria uma aventura do espírito**: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4**: ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 3

OS POSTULADOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Papel do professor

Apresentar e discutir com os alunos os postulados da teoria da relatividade restrita como uma solução para as observações quanto a constância da velocidade da luz, independentemente do referencial do observador.

Estimular a imaginação dos alunos para mudança de paradigma quando ao que é absoluto e relativo no estudo de movimentos.

O que se espera

Que o aluno compreenda que a velocidade da luz é apresentada na teoria da relatividade como uma grandeza constante, ou seja, absoluta na natureza e que não é possível realizar adição ou subtração de seu valor, como apresentado na equação 2.2a e 2.2b.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Realizar um breve resgate do assunto tratado durante a Aula 2.

Atividade 2 – Abordar junto aos alunos os esforços dos cientistas no final do século XIX em descobrir o referencial privilegiado para o qual a velocidade da luz (onda eletromagnética) tivesse o valor proposto na teoria do eletromagnetismo de Maxwell. A não confirmação experimental da existência do éter vai culminar nos postulados da relatividade restrita.

Atividade 3 – Leitura individual da HQ referente a Aula 3, apresentada na Figura 7.

Atividade 4 – Breve partilha com os alunos sobre os aspectos que mais chamaram a atenção ou não foram bem compreendidos. Se necessário, retomar os conhecimentos prévios para fixação dos termos velocidade relativa, absoluta e constante.

Atividade 5 – Realizar a leitura conjunta e comentários do texto de apoio para os alunos.

Atividade 6 – Realizar pesquisa *online* (utilizando *smartphone*) do significado da palavra postulado e uso do simulador *Physics at School*, sobre o experimento de Michelson e Morley.

Atividade 7 – Assistir o vídeo proposto, resumindo a teoria da relatividade restrita.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 3.

Após a realização da Atividade 1 (relembrar o assunto da aula anterior), é abordado forma expositiva e dialogal pelo professor (Atividade 2) os esforços em provar experimentalmente a existência do éter, referencial no qual o valor da velocidade da luz é válido.

Para essa abordagem, frisar que, utilizando métodos experimentais distintos, os esforços de cientistas como Fizeau (1859), Babinet (1862), Ångström (1864), Mascart (1872), e com maior repercussão, Michelson e Morley (1887) (MARTINS, 2015), tentaram detectar o movimento da Terra através do éter, observando variações na velocidade da luz. Como nenhuma das tentativas detectou variações na velocidade da luz, algo não esperado, surgem tentativas de explicações, o que nos levam aos postulados da Teoria da Relatividade Restrita. E sem dúvida frisar sobre a participação de Maxwell com a sua teoria do eletromagnetismo nesta aventura científica, o que levou Einstein a propor tais postulados é o que trata a próxima HQ.

Atividade 3 – Leitura da HQ – Aula 3 (Figura 7)

Figura 7 – Terceira página da HQ – Aula 3: os postulados da Teoria da Relatividade Restrita.



Fonte: o autor.

Atividade 4 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 3

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 5 – Leitura do material de apoio: A velocidade da luz

Texto para os alunos: A velocidade da luz

A grande maioria dos cientistas, no final do século XIX, acreditavam ser necessária a existência do éter no espaço, como o referencial privilegiado em que a luz teria seu valor $c = 300.000.000$ m/s, conforme o previsto na teoria eletromagnética proposta por Maxwell. Acreditava-se também, na possibilidade de medir a velocidade da Terra em relação ao éter, somando velocidades, conforme a física clássica/transformações de Galileu, equações (2.1a) e (2.1b).

O segundo quadrinho central da HQ menciona que várias tentativas de se provar a existência do éter foram realizadas. A mais famosa consiste no experimento de Michelson e Morley, em 1887, por meio de um aparato experimental denominado interferômetro. O experimento consiste em um feixe de luz dividido em outros dois que percorrem direções perpendiculares. Uma das direções seria coincidente ao movimento de translação da Terra; a outra direção, como já dito, perpendicular a esse movimento. Após percorrerem distâncias iguais (os braços do interferômetro), os feixes separados incidem em espelhos, refletindo e se recombinando novamente. O feixe que está na mesma direção do movimento da Terra sofreria o efeito contrário do vento do éter, reduzindo sua velocidade. A menor velocidade provocaria uma diferença do tempo de propagação desse feixe em relação ao outro, que por sua vez seria percebida pelo interferômetro.

Apesar da precisão do aparelho, não foram encontradas evidências da existência do éter. Outra informação importante realizada foi a constância da velocidade da luz, independentemente da orientação do aparelho durante a realização das medidas.

Com base nos resultados negativos encontrados quanto ao éter, Einstein rompe definitivamente com a ideia de sua existência, ao mesmo tempo que propõem os dois postulados da teoria da relatividade restrita.

1.º postulado: para todos os referenciais inerciais, as leis da Física serão sempre as mesmas.

2.º postulado: a velocidade da luz é constante para qualquer referencial inercial.

O segundo postulado apresenta a luz com uma velocidade limite c , e, ao mesmo tempo, como uma constante da natureza. Independentemente de quem estiver

observando a fonte de luz em repouso, em seu referencial ou em movimento em um referencial, com velocidade constante, o valor de $c = 300.000.000 \text{ m/s}$, ela permanecerá inalterada, fato ilustrado no primeiro quadrinho central da HQ.

Atividade 6 – Fechamento da aula: pesquisa a ser realizada por meio de *smartphone* e utilização do simulador *Physics at school* para o experimento de Michelson e Morley

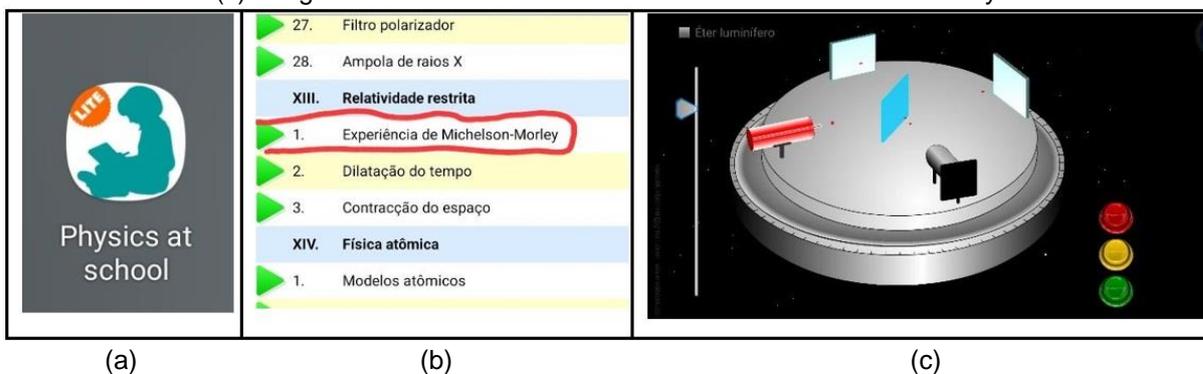
Para o fechamento da aula, foram propostas as seguintes questões:

1) Primeiramente, pesquise o significado da palavra **Postulado**.

Proposição não demonstrada e não evidente, que é considerada ponto de partida de um sistema teórico; princípio admitido.

2) Utilizaremos o aplicativo de *Physics at school* instalado no *smartphone*, para analisar os resultados do experimento de Michelson e Morley (Figura 8).

Figura 8 – Imagens do aplicativo *Physics at school*. (a) Ícone do aplicativo; (b) Seleção da simulação; (c) Imagem do simulador do interferômetro de Michelson e Morley.



Fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt#kapitola12>. Acesso em 15/07/2022.

Na Figura 8c visualizam-se três botões de comando (vermelho = parar, amarelo = pausar e verde = iniciar). É possível visualizar uma barra para rotação do aparato experimental em relação a direção do movimento e por fim, uma opção de realização da simulação com ou sem o éter luminífero. A finalidade da simulação é verificar se há variações na figura de interferência com a mudança do meio e da orientação do interferômetro.

Um modelo de interferômetro foi utilizado para demonstrar experimentalmente a existência de ondas gravitacionais. Como um objeto massivo é capaz de produzir

deformação na estrutura espaço-tempo, também poderia produzir ondulações quando em movimento. No entanto a sua comprovação ocorreu em 2015 por meio do LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*⁸), em Washington e na Lousiana, que detectou os resultados da colisão de buracos negros. (NASCIMENTO, CUZINATTO. 2022, p. 2).

Atividade 7 – Assistir um vídeo sobre o assunto da terceira página da HQ

Para conclusão da aula, os alunos devem assistir ao vídeo que trata da novidade da teoria da relatividade em considerar o espaço-tempo como grandeza relativa, enquanto a velocidade da luz se mostra como grandeza absoluta. Após o vídeo, faz-se um momento de comentários com a turma.

VÍDEO: *O Espaço-Tempo Explicado*.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kJ5xNaSleTI>>.

Duração: 11min58s.

Algumas informações do vídeo serão destacadas e tratadas na próxima aula: a contração do espaço e a dilatação do tempo.

Caso não haja compreensão dos(as) alunos(as) sobre as franjas de interferência, é possível a realização de um experimento simples, utilizando um fio de cabelo e uma ponteira *laser*. O trabalho de Oliveira⁹ (2016), para a conclusão do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), neste mesmo polo, apresenta com detalhes o experimento com o fio de cabelo e a ponteira *laser*, mesmo que para outro fim, diferente do descrito no presente trabalho.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – *“Introdução experiência de Michelson-Morley - A relatividade especial - Física - Khan Academy”* - YouTube. Duração: 8min36s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bv2ataBdQ78>>. Acesso em: 07/07/2022.

- TEXTO 1 – *“O Experimento de Michelson-Morley”* – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/o-experimento-de-michelson-morley/>>. Acesso em: 05/06/2022.

⁸ Observatório de ondas gravitacionais com interferômetro a laser.

⁹ Disponível em: <http://www.dfi.uem.br/dissertacao/mnpef/uem.php>.

Referências

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

MARTINS, Roberto de Andrade. **A origem histórica da relatividade especial**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

NASCIMENTO, Nicolas. L. N. S.; CUZINATTO, Rodrigo. R.. Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20220004, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0004>>. Acesso em 16/04/2023.

MENEZES, Luis Carlos de. **A matéria uma aventura do espírito**: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005).

UNIDADE DIDÁTICA 4

DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Papel do professor

A partir da mudança entre as grandezas físicas consideradas relativas e absolutas a partir dos postulados de Einstein, despertar o interesse e o questionamento dos alunos sobre o comportamento do espaço-tempo na teoria da relatividade restrita.

Mostrar para os alunos que o conceito de dilatação temporal está presente no funcionamento do aparelho de GPS.

O que se espera

O aluno deverá terminar a aula entendendo a dilatação temporal e a contração do espaço como uma realidade da natureza, mesmo contrariando nosso senso comum.

Entenda que o aparelho/aplicativo de GPS só pode indicar a posição com ótima precisão caso aplique as correções previstas na teoria da relatividade.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Inicia-se a aula com uma breve revisão sobre os postulados da teoria da relatividade restrita.

Atividade 2 – Indaga-se os alunos sobre a seguinte questão:

Uma vez que a teoria da relatividade restrita prevê que a velocidade da luz tenha sempre o mesmo valor para todo observador, em referenciais inerciais distintos, o que você espera que aconteça com os valores do tempo e do espaço?

Estimular para que as repostas não se limitem em “sofram mudança” ou “sejam relativas”.

Atividade 3 – Leitura individual da HQ (Figura 9) proposta para a aula.

Atividade 4 – Reserva-se um momento para ouvir os alunos sobre que chamou a atenção durante a leitura, as descobertas e dúvidas.

Atividade 5 – Realiza-se a leitura coletiva do texto para o aluno (Dilatação do tempo e contração do espaço), reservando um tempo ao final da leitura para conversa com os alunos. Fazer a leitura com calma procurando esclarecer todos os aspectos.

Atividade 6 – Assistir, na sequência, o vídeo “GPS, como funciona?”, objetivando uma aplicação cotidiana da teoria da relatividade, especificamente de um aparelho/aplicativo de GPS.

Atividade 7 – Utilização de simulador *online* sobre a dilatação do tempo, assim como uma calculadora, também *online*, para obtenção do resultado da dilatação temporal.

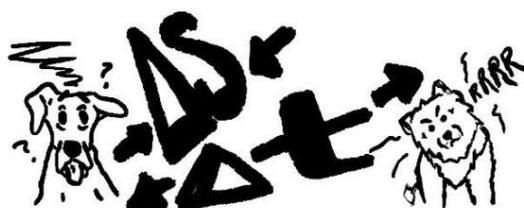
Atividade 8 – Desafia-se os alunos a realizarem um desenho, mesmo que simples, representando os efeitos da dilatação temporal e da contração do espaço. Pode ser proposto como atividade domiciliar.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 4.

Após ter realizado as Atividades 1 e 2, inicia-se a Atividade 3 que consiste na leitura da quarta página da HQ. O seu conteúdo levará a compreender o que ocorrerá com a calda do Ben, se ela será prensada pelas placas ou não. Além disso, levará os alunos a compreender como funciona um GPS, sendo essa uma das aplicações da teoria da relatividade que está presente no cotidiano do público em geral.

Atividade 3 – Leitura da HQ – Aula 4 (Figura 9)

Figura 9 – Quarta página da HQ – Aula 4: dilatação do tempo e contração do espaço.



Aula 4 DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO



Bob, o que muda com os postulados de Einstein?

Vamos começar pela física clássica.

A ideia mais simples que podemos ter sobre velocidade é a divisão entre um deslocamento e o tempo que foi gasto.

$$v = \frac{d}{t}$$

Duas pessoas podem medir valores diferentes de velocidades em referenciais diferentes. Igual na brincadeira com o carrinho que fizemos. Neste caso, a velocidade é relativa.

Para mim você está enrolando, já sabemos de tudo isso.

Calma... Outra coisa importante: independente do observador, 1 metro e 1 segundo é sempre igual para todos, ou seja, são absolutos.

Temos então o problema: para a velocidade da luz ser constante, ou seja, absoluta, em todos os referenciais inerciais, o espaço e o tempo devem ser relativos.

Não estou acreditando no que estou ouvindo!

Para velocidades próximas a da luz temos fenômenos que vão contra nosso senso comum e são chamados de dilatação do tempo e contração do espaço.

É sério o que você está falando? O tempo demora mais para passar e o tamanho das coisas diminuem?

Tudo papo furado. Nem tem como provar isso.

Tem sim. Inclusive nós utilizamos a relatividade com frequência no aparelho de GPS.

Fonte: o autor.

Atividade 4 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 4

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 5 – Leitura do material de apoio: dilatação do tempo e contração do espaço

Texto para os alunos: Dilatação do tempo e contração do espaço

A velocidade é uma grandeza física que relaciona o tempo necessário para que um objeto saia de uma posição e chegue a outra, realizando um deslocamento. Na mecânica clássica de Newton, é possível que observadores em referenciais inerciais distintos verifiquem valores diferentes para a velocidade do objeto em movimento. A relação dentre os valores encontrados se dá por meio das transformações de Galileu (equações 2.1a – 2.1b).

O segundo postulado da teoria da relatividade propõe que a velocidade da luz é sempre igual para qualquer referencial inercial, ou seja, seu valor é absoluto e, para que isso se torne possível, o espaço e o tempo devem ser relativos. Tem-se assim, os efeitos da dilatação do tempo e a contração do espaço. Um relógio se movendo próximo a velocidade da luz marcaria o tempo lentamente quando comparado a outro em repouso. Já uma régua teria suas dimensões comprimidas na mesma situação.

A dilatação do tempo e a contração do espaço são os aspectos que mais desafiam o senso comum quando se trata da teoria da relatividade.

Consideram-se dois observadores, O_1 em um referencial R em repouso e outro, O_2 em repouso num referencial R' , um trem por exemplo (Einstein utilizava muitos trens como exemplos), com velocidade constante v muito grande, próxima a velocidade da luz (v aproximadamente igual a c). Cada observador medirá o tempo de forma diferente em seu referencial quando comparados, sendo que o observador em movimento relativo observará o tempo passando mais devagar. A diferença entre os tempos medidos será dada pela expressão:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \quad (2.3)$$

em que γ (letra grega gama) é chamado fator de Lorentz, dado por:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2.4)$$

Vamos considerar, agora, que no trem haja uma barra em repouso e com seu comprimento na direção do movimento do trem. Cada observador perceberá a barra com um comprimento diferente, sendo menor para o observador em repouso. A relação entre os diferentes comprimentos é dada pela expressão:

$$L = \frac{L'}{\gamma}. \quad (2.5)$$

O comprimento L' é chamado de comprimento próprio e consiste no tamanho percebido pelo observador em repouso relativo à barra.

Mesmo contrariando o senso comum, o efeito da dilatação do tempo é utilizado para que o aparelho/aplicativo de GPS (*Global Positioning System*) funcione adequadamente.

Atividade 6 – Apresentação do vídeo sobre o funcionamento do GPS

Sobre a aplicação da teoria da relatividade, mais especificamente sobre a dilatação do tempo, no funcionamento de GPS, assistir ao vídeo:

VÍDEO: *GPS, como funciona?*

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qzOA41vA8Qw&t=6s>>.

Duração: 7min36s.

Visto a questão da dilatação temporal e contração espacial, é possível solucionar a dúvida sobre a calda do Ben, apresentada na página da HQ da Aula 2 e na Figura 6. A explicação está apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Resposta ao problema da calda do Ben na página da HQ da Aula 2.



Fonte: o autor.

Atividade 7 – Utilização de simulador *online*

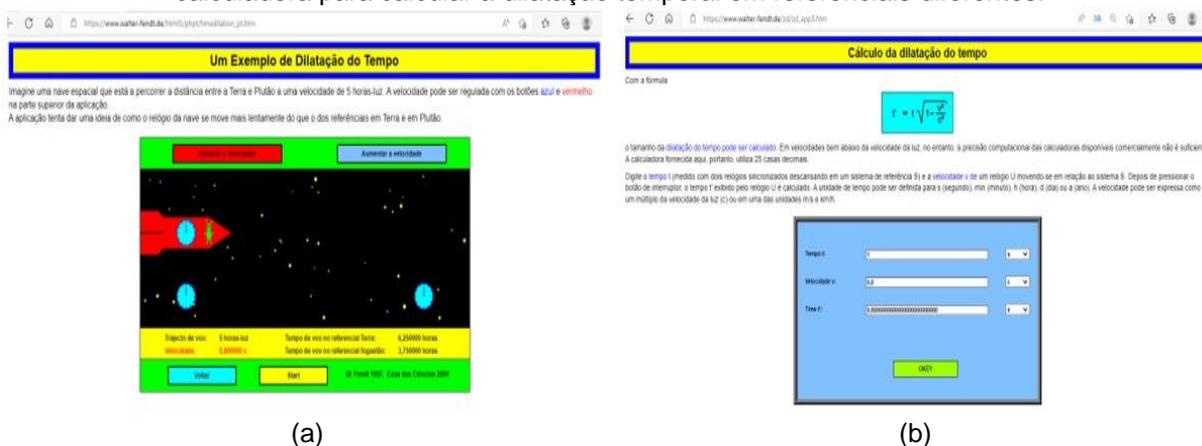
Observar valores da dilatação do tempo por meio da equação 2.3, conferindo os valores com o simulador e a calculadora *online* da página Walter Fendt na *internet*:

- Simulador: <https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm>.

- Calculadora: <https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm>.

Na Figura 11a, percebe-se relógios em referenciais diferentes, em repouso e em movimento no interior da nave. Ao variar a velocidade da nave, verifica-se que o efeito da dilatação do tempo por meio das marcações dos relógios a medida que velocidade se aproxima da velocidade da luz. A Figura 11b por sua vez, apresenta a calculadora do *site*, onde é possível determinar os valores da dilatação do tempo para referenciais diferentes.

Figura 11 – *Print* de tela do simulador disponibilizado por Walter Fendt: (a) página inicial e (b) calculadora para calcular a dilatação temporal em referenciais diferentes.



Fontes: (a) = https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm
 (b) = https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm. Acesso em 15/07/2022.

Atividade 8 – Desafio aos alunos – atividade lúdica sobre o tema da aula

Desafio para os alunos: desenharem, mesmo que desenhos simples, algo representando a dilatação do tempo e a contração do espaço.

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “Uma proposta de inserção da teoria da relatividade restrita no Ensino Médio via estudo do GPS”. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/ZR35rghCQxRq6rp9t7MsDvs/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 17/07/2022.

- VIDEO 1 – “Contração do espaço, dilatação do tempo e paradoxo dos gêmeos”. YouTube. Duração: 12min38s. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ody2-_oNDuA>. Acesso em 20/07/2022.

- FILME – “Contato” – Plataformas de Streaming – Duração: 2h29min. 1997.

Referências

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade:** sobre a teoria da relatividade especial e geral (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4:** ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna.** 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 5

O PARADOXO DOS GÊMEOS

Papel do professor

O professor deve apresentar e debater com os alunos sobre o experimento mental do paradoxo dos gêmeos. Se ele seria possível acontecer realmente e os resultados encontrados.

Por outro lado, na natureza, as partículas múons são uma forma de demonstrar que o efeito da dilatação do tempo é real, sendo considerada a explicação para a diferença entre o tempo de vida desta partícula em laboratório e ao entrarem na órbita da Terra.

O que se espera

Espera-se que os alunos entendam minimamente o paradoxo dos gêmeos, problema muito comum de se encontrar em livros ou referências sobre a teoria da relatividade.

Que além do GPS, fique claro aos alunos o comportamento das partículas denominadas múons, comprovando-se, na natureza, que a dilatação do tempo é real.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Breve revisão da última aula e apresentação dos desenhos realizados na atividade domiciliar.

Atividade 2 – Leitura individual da HQ referente à Aula 5, abordando o paradoxo dos gêmeos, um dos experimentos mentais¹⁰ mais conhecidos sobre a teoria da relatividade, abordando sua validade e suas possibilidades, uma vez que um dos referenciais está sob efeito de uma aceleração.

Atividade 3 – Ouvir os alunos sobre as informações que mais chamaram a atenção ou deixaram alguma dúvida.

Atividade 4 – Fazer a leitura coletiva do texto de apoio aos alunos em que é abordada a aplicação da dilatação do tempo para o entendimento do tempo de meia vida das partículas múons.

Atividade 5 – Essa aula será reservada para a resolução de alguns exercícios de vestibular sobre teoria da relatividade.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 5.

Após a revisão do conteúdo visto até o momento (Atividade 1), passa-se a Atividade 2 que é uma continuação sobre o assunto da dilatação temporal e contração espacial com um exemplo comumente citado da teoria da relatividade, denominado Paradoxo dos Gêmeos. Esta página da HQ ainda trata sobre a detecção de uma das partículas elementares, o múon. Mais uma comprovação experimental da validação da teoria da relatividade.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 5 (Figura 12)

¹⁰ Experimento mental (*Gedanken* de Einstein): trata-se de um experimento não realizável na prática, porém, e idealizado mentalmente e constituído racionalmente. Os resultados são explorados pela imaginação, utilizando conceitos físicos e matemáticos.

Figura 12 – Quinta página da HQ – Aula 5: o paradoxo dos gêmeos.

Aula 5

O PARADOXO DOS GÊMEOS



Estou com dificuldade de entender essa história de contração do espaço e dilatação do tempo.

Tem uma situação que é utilizada para ajudar na compreensão da dilatação do tempo: o Paradoxo dos Gêmeos.

Vamos imaginar que o Ben tivesse um irmão gêmeo que fosse participar de uma missão espacial muito longe da Terra.

Sabia que iria sobrar pra mim.

A nave viaja com 90 % da velocidade da luz e demora 4 anos para concluir a viagem e retornar!

Utilizando a equação da dilatação temporal teremos que para o Ben, que ficou na Terra, passaram-se aproximadamente 9 anos.

Quer dizer que meu irmão estará 5 anos mais novo?

Nossa! Mas isso não acontece realmente?

Acontece sim. Inclusive é por meio da dilatação do tempo que os cientistas explicam como as partículas "múons" conseguem atingir a superfície da Terra, mesmo não apresentando tempo de vida média suficiente para isso.

O que é isso de múons

A física de partículas estuda as menores parcelas de matéria que formam tudo que conhecemos. As partículas que mais ouvimos falar são os prótons, nêutrons e elétrons. Os múons são outros exemplos assim como os fótons que são partículas de luz.

Pra variar, só enrolação... E o tal de "desvio da luz" das estrelas?

Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 5

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e o professor, para apontarem os destaques, as descobertas e as dúvidas após a leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: os múons

Texto para os alunos: Os múons¹¹

Um problema bastante comum em relatividade restrita é o que envolve o caso das partículas de altas energias, também chamados raios cósmicos. Na verdade, estamos interessados no que ocorre numa partícula que é um produto da interação dos raios cósmicos com a atmosfera da Terra. Os múons (cujo símbolo é a letra grega μ) são classificados em física de partículas como léptons, do grego leve. Temos como exemplo o elétron, o tau e os neutrinos.

Os raios cósmicos que geralmente são constituídos de prótons altamente energéticos, penetram na atmosfera da Terra e chocam-se com as moléculas de ar. Desse choque entre prótons energéticos e as moléculas da atmosfera, outras partículas se formam, como exemplos os píons e os káons. Múons que são partículas elementares e geralmente decaem em um elétron, um neutrino do múon (ν_μ) e num antineutrino do elétron (ν_{e^-}).

O tempo de vida de um múon é de aproximadamente $2,2 \mu s$ ¹². Tempo esse medido em seu referencial, ou seja, com o múon em um laboratório por exemplo, possuindo baixa velocidade.

Grande parte dos múons são criados a uma altitude de aproximadamente 15 km possuindo uma velocidade da ordem de $0,9998c$ (c = velocidade da luz no vácuo = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Esta alta velocidade faz com que o seu tempo de vida no sistema de referencial do laboratório seja dilatado permitindo que a maioria alcance a superfície da Terra.

¹¹ Texto adaptado do original: “Múon Relativístico” – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 05/06/2022.

¹² A letra grega μ (lê-se mú ou mi) também é utilizada para representar a notação científica 10^{-6} (micro), como nesse caso.

Pensando em um movimento com velocidade próxima à velocidade da luz para os múons, e calculando a distância percorrida ao entrarem na atmosfera usando a equação da velocidade $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, para $v = c$, isolando o deslocamento Δs :

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$

$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot (2,2 \cdot 10^{-6}) \Delta s = 660m$$

Como é possível, então, que múons percorram apenas 660 m atmosfera adentro, e, ainda assim, sejam detectados próximos da superfície da Terra, que fica a aproximadamente 10.000 m mais distante do que o múon pode percorrer?

O tempo de vida do múon dilata-se em relação ao referencial do laboratório que está em Terra. Pode-se calcular essa dilatação aplicando as equações 2.3 e 2.4,

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

em que $\Delta t' = 2,2 \cdot 10^{-6} s$ (tempo próprio do múon) e $v = 0,9998c$. Assim:

$$\Delta t = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{0,9998^2 c^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = 110 \mu s.$$

Um resultado que faz com que o múon relativístico leve mais tempo para decair.

Uma sugestão é conferir o resultado utilizando a calculadora da página Walter Fendt (https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm), ilustrada na Figura 13.

Figura 13 – Print da tela da calculadora do site Walter Fendt.

Fonte: https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm. Acesso em: 15/01/2023.

Utilizando esse valor de vida e aplicando novamente,

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$

$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot 110 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta s = 33.000m.$$

O que dá como resultado uma distância suficiente para ser detectada ao chegar próximo da superfície da Terra. Mostrando assim, que há uma dilatação do tempo em $107,8 \mu s$, possibilitando um deslocamento 50 vezes maior que o esperado em laboratório, comprovando, assim, o previsto pela teoria da relatividade.

Atividade 5 – Fechamento da aula: resolução de quatro questões de vestibulares

1 - (UEL PR) A Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, mas em perfeito acordo com os resultados experimentais. Ela é aplicada, entretanto, somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, válida não só para referenciais inerciais, mas também para referencial não-inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, consideram as seguintes afirmativas:

- I. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade constante.
- II. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade variável.
- III. Observadores em referenciais inerciais diferentes medem a mesma aceleração para o movimento de uma partícula.

Assinale a alternativa correta

- A) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- B) Apenas a afirmativa II é verdadeira.
- C) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- D) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- E) As afirmativas I e III são verdadeiras. **(X)**

2 - (CFT-CE) Em 2005, Ano Mundial da Física, comemora-se o centenário da Teoria da Relatividade de Albert Einstein. Entre outras consequências esta teoria poria fim à ideia do éter, meio material necessário, semelhantemente ao som, através do qual a luz se propagava. O jargão popular “tudo é relativo” certamente não se deve a ele,

pois seus postulados estão fundamentados em algo absoluto: a velocidade da luz no vácuo – 300.000 km/s. Hoje sabe-se que:

- I. O som propaga-se no vácuo.
- II. A luz propaga-se no vácuo.
- III. A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite do universo.

É (são) verdadeira(s):

- A) todas
- B) nenhuma
- C) somente II
- D) II e III (X)
- E) somente III

3 - (UFRGS) De acordo com a Teoria da Relatividade quando objetos se movem através do espaço-tempo com velocidades da ordem da velocidade da luz, as medidas de espaço e tempo sofrem alterações. A expressão da contração espacial é dada por $L = L_0(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, onde v é a velocidade relativa entre o objeto observado e o observador, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, L é o comprimento medido para o objeto em movimento, e L_0 é o comprimento medido para o objeto em repouso.

A distância Sol-Terra para um observador fixo na Terra é $L_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. Para um nêutron com velocidade $v = 0,6 c$, essa distância é

- A) $1,2 \cdot 10^{10}$ m
- B) $7,5 \cdot 10^{10}$ m
- C) $1,0 \cdot 10^{11}$ m
- D) $1,2 \cdot 10^{11}$ m (X)
- E) $1,5 \cdot 10^{11}$ m

Utilizando as equações 2.4 e 2.5, tem-se:

$$L = \frac{L_0}{\gamma} \quad \text{ou} \quad L = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,6^2 \cdot c^2}{c^2}}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{1 - 0,36}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{0,64}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,8$$

$$L = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

4 - (UFPE) – Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $0,8c$, em que c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

Utilizando as equações 2.3 e 2.4, tem-se:

$$\Delta t = \Delta t' \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad \Delta t = 12 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,8^2 c^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = 12 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 0,64}}$$

$$\Delta t = \frac{12}{\sqrt{0,36}} \quad \Delta t = \mathbf{20 \text{ meses.}}$$

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “O Paradoxo dos Gêmeos Explicado” – YouTube. Duração 11min05s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=98OvQpOkOIU>>. Acesso em: 17/05/2022.

- VÍDEO 2 – “Raios Cósmicos, múon, Dilatação do Tempo e Contração do Espaço” – YouTube. Duração 9min53s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=QnLxDDyIEsM>>. Acesso em 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “A vida do múon” – Disponível em: <<https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/2RelatividadeEspecial/2Avidadomuon/Avidadomuon.html>>. Acesso em: 12/06/2022.

- TEXTO 2 – “Medida da vida média do múon” – Disponível em: <<https://progp.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/wp-content/uploads/2018/04/Medida-da-vida-m%C3%A9dia-do-m%C3%BAon.pdf>>. Acesso em: 21/07/2022.

- TEXTO 3 – “Partículas elementares” – Disponível em: <<https://felipe9aes.wixsite.com/particulas/inicio>>. Acesso em: 21/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

PEREIRA, Ricardo Vieira. **Múon relativístico**. Produto educacional do programa de Mestrado Nacional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF) do polo da Universidade Federal do ABC (UFABC), 2019. Disponível em: <<https://progp.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 12/06/2022.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 6

O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

Papel do professor

Espera-se que o professor possa envolver os estudantes no processo de ensino-aprendizagem, desenvolvendo junto a eles a segurança e a autonomia para exporem os conhecimentos adquiridos.

Que ele possa conduzir os alunos a vislumbrar a possibilidade de alcançar o conhecimento e conseguir reproduzi-lo.

Incentive o debate entre os alunos.

O que se espera

Ao término da aula, espera-se que os alunos sejam capazes de compreender a relação entre o efeito de um campo gravitacional e da aceleração, ou seja, o princípio da equivalência.

Que os alunos tenham argumentos para abordar aspectos relevantes da teoria da relatividade restrita e geral, conseguindo expressar por meio de exercícios de fixação. E sejam capazes de colaborar mutuamente, compartilhando os conhecimentos adquiridos.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Inicia-se com um breve resumo da Aula 5 e, caso seja necessário, retomar os exercícios propostos.

Atividade 2 – Uma motivação para o tema dessa aula, seguida pela leitura individual da HQ.

Atividade 3 – Abre-se o debate como os estudantes com a finalidade de conferir o entendimento deles assim como suas dúvidas e questionamentos. Caso os alunos não interajam com questionamentos, cabe ao professor conduzir as questões aos alunos induzindo-os a reflexão.

Atividade 4 – Aprofunda-se o tema com a leitura do texto para os alunos sobre o princípio da equivalência. Novamente, cria-se um momento de partilha sobre as impressões dos alunos.

Atividade 5 – Assistir ao vídeo proposto com o tema da relatividade geral. Seguido pela realização da atividade proposta.

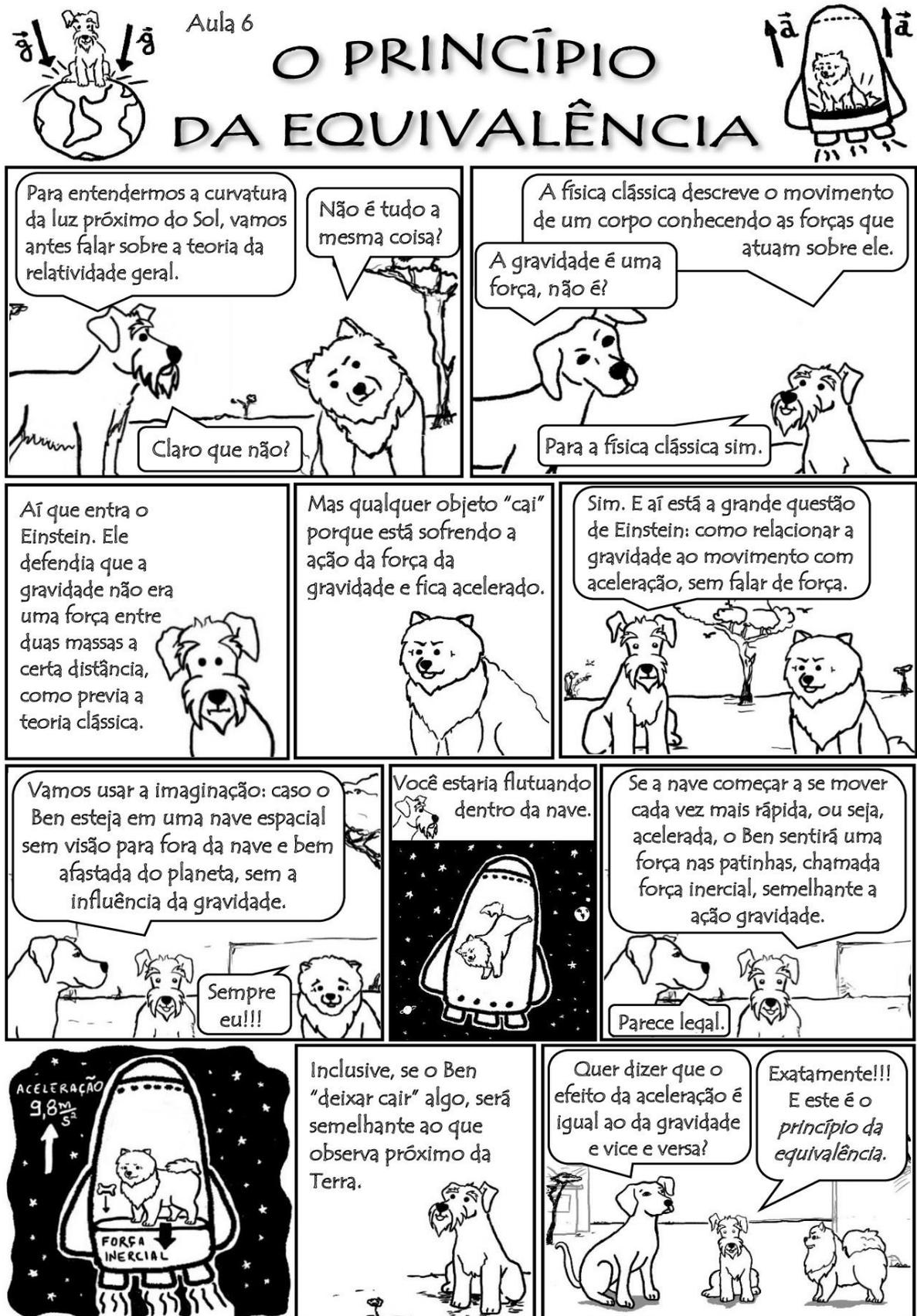
Atividade 6 – A última atividade dessa sexta aula visa incentivar os estudantes a expressarem os conhecimentos adquiridos até o momento por meio da elaboração de palavra cruzada ou cruzadinha, assim como uma autoanálise referente à maneira de como expressaram os conhecimentos adquiridos.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 6.

Após os alunos realizarem a Atividade 1, passa-se à Atividade 2, ou seja, explicar a motivação do conteúdo da sexta página da HQ (Figura 14), em que se introduz a Teoria da Relatividade Geral. Para essa abordagem, analisar o que diz o chamado Princípio da Equivalência, pois esse princípio é o que conduzirá a compreensão do motivo da luz se curvar e em quais condições.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 6 (Figura 14)

Figura 14 – Sexta página da HQ – Aula 6: o Princípio da Equivalência.



Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 6

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após a leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: princípio da equivalência

Texto para os alunos: Princípio da equivalência¹³

Se um observador está em pé sobre uma balança dentro de um elevador fechado, ao perceber que o ponteiro da balança começa a indicar um valor diferente para sua massa, duas explicações são possíveis.

- 1 – o elevador está em movimento com velocidade variável em módulo, ou
- 2 – o campo gravitacional local mudou.

Algo semelhante é sugerido no primeiro quadrinho da última tirinha da HQ.

Se o cabo do elevador arrebentou e ele entra em queda livre, a balança vai indicar zero, situação que chamamos de imponderabilidade¹⁴. O observador e todos os objetos dentro do elevador parecem flutuar. Na HQ da sexta aula tal situação é ilustrada de forma semelhante no segundo quadrinho da terceira tirinha. Esse efeito de flutuação sugere gravidade zero, mas na verdade pode ser conseguido de duas formas:

- 1 – pela anulação do campo gravitacional, ou
- 2 – por um movimento do elevador com aceleração igual à gravidade em módulo.

De dentro do elevador, sem observar o que acontece lá fora, não há como saber o que de fato está acontecendo. A impossibilidade de decidir entre as duas explicações aceitáveis acima constitui basicamente o princípio da equivalência, que diz: Se um observador está dentro de um recinto fechado, sem ter como olhar para fora, não há como saber se o recinto está sob a ação de um campo gravitacional uniforme ou se está acelerado. Ou seja, a imponderabilidade.

¹³ Texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.

¹⁴ Imponderabilidade é o estado em que não se pode discernir se está sob a ação de um campo gravitacional ou em queda livre. Também é descrita como a sensação de ausência de compressão de apoio, resultante da ausência de força normal. (Wikipedia).

A dupla possibilidade entre a ação de um campo gravitacional ou de uma aceleração é denominado princípio da equivalência.

Atividade 5 – Compartilhar o vídeo “A relatividade geral explicada”, disponível no site: Ciência todo dia

Como forma de complementar os conhecimentos expostos até o momento, assistir ao vídeo indicado, seguido de momento de reflexão.

VÍDEO: *A relatividade geral explicada.*

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jYlr3G9yB8s>>.

Duração: 10min47s.

Atividades 6 – Fechamento da aula: elaboração de caça-palavras ou cruzadinha

A atividade dessa aula será desenvolvida pelos próprios alunos, organizados em pequenos grupos com 3 ou 4 alunos. Cada grupo desenvolve um caça-palavras ou uma cruzadinha, abordando o entendimento referente aos tópicos sobre relatividade estudados até agora.

Um grupo apresenta sua atividade para que o outro possa resolver. Ao término da atividade, os grupos trocam entre si opiniões sobre o que foi desenvolvido pelo outro grupo. Avaliação entre os pares, no caso, entre os grupos.

Materiais complementares

- VIDEO 1 – “RG05 - Princípio de equivalência” – YouTube – Duração: 20min44s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kSG4MqrWpFI>>. Acesso em: 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “Teoria da relatividade geral” – Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/teoria-relatividade-geral.htm>>. Acesso em 23/07/2022.

- TEXTO 2 – “Princípio da equivalência” – Disponível em <<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node4PE.html#:~:text=na%20forma%20seguinte%3A-,Princ%3%ADpio%20da%20Equival%3%AAncia%20%5BEinstein%5D%20...,duas%20situa%3%A7%C3%B5es%20por%20qualquer%20experi%C3%AAncia%22%20.>>>. Acesso em 11/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcideo. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

UNIDADE DIDÁTICA 7

A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

Papel do professor

Cabe ao professor, no decorrer da aula, apresentar o efeito da curvatura do espaço-tempo na presença de um corpo altamente massivo.

Estimular a imaginação dos alunos para que compreendam como se dá a deformação do espaço-tempo na presença de um corpo com muita massa, a exemplo das estrelas. Para melhor entendimento sobre o que significa um corpo ter muita massa, normalmente ela é expressa em termos da massa do Sol, que é de aproximadamente $1,99 \cdot 10^{30}$ kg.

Discutir com os alunos a trajetória da luz no espaço-tempo curvo como uma explicação para as observações realizadas na cidade de Sobral em 1919.

Incentivar para que os alunos respondam o questionário final com tranquilidade e satisfação pelo caminho percorrido até aqui na aprendizagem de aspectos da teoria da relatividade.

O que se espera

Que os alunos sejam capazes de compreender como o princípio da equivalência conduz ao entendimento da curvatura do espaço-tempo, fazendo a relação entre o que foi apresentado durante a aula e a explicação da observação realizada durante o eclipse na cidade de Sobral – CE, em 1919.

Com base na abordagem dos temas referentes à teoria da relatividade, apresentados durante as aulas, que os alunos sejam capazes de responder o questionário avaliativo final, com tranquilidade e convicção.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – O primeiro passo é que se retome o tema da aula anterior sobre o princípio da equivalência conduzindo a abordagem para o efeito da curvatura do espaço-tempo.

Atividade 2 – Após, realiza-se a leitura individual da HQ da Aula 7.

Atividade 3 – Comenta-se sobre o que se entendeu ou gerou dúvidas por parte dos alunos.

Atividade 4 – Numa próxima etapa da aula, é realizada a leitura coletiva e a discussão do texto para o aluno.

Atividade 5: Sugere-se assistir ao vídeo 1 (Como a gravidade deforma o tempo? Relatividade Geral), indicado nos materiais complementares.

Atividade 6 – Realizadas as devidas considerações sobre o tema da curvatura do espaço-tempo, retoma-se a problematização inicial, apresentado na primeira aula: a observação da luz de estrelas durante o eclipse observado em Sobral, em 1919.

Atividade 7 – Responde-se o questionário final para observar e quantificar a aprendizagem dos alunos.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 7.

Chegamos ao fim de nossa jornada na HQ envolvendo a teoria da relatividade e usa primeira comprovação experimental, ainda mais envolvendo uma expedição ao Brasil para essa comprovação. Esse fato ocorreu há 104 anos e a teoria da relatividade continua sendo atual, como a sua aplicação no GPS, na detecção das ondas gravitacionais, já comentados anteriormente. Após trabalhar com os alunos a atividade 1, a proposta da atividade 2 é ler a última página da HQ (Figura 15).

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 7 (Figura 15)

Figura 15 – Sétima página da HQ – Aula 7: a curvatura do espaço-tempo.

Aula 7

A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

Dentro da nave, sem ter visão de fora, não é possível definir se a nave está sobre a ação da gravidade ou acelerada.

Isso mesmo. Por isso o nome "princípio da equivalência".

Agora podemos falar sobre a curvatura da luz.

Opa! O "bicho vai pegar"!

Pensa comigo Ben: se uma pessoa está num elevador em queda livre com uma lanterna na mão. Como ela vê a trajetória da luz?

Vê, em linha reta! Batendo o tempo todo no mesmo lugar.

Exatamente. A pessoa e a lanterna estão no mesmo referencial.

E se o observador estivesse em um referencial externo ao elevador?

Vê! Neste caso, como o elevador está em queda acelerado e a luz bate o tempo todo no mesmo ponto do elevador. Quem está fora iria observar a luz numa trajetória curva.

Não estou entendendo nada!

Pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito seria possível pela ação do campo gravitacional.

Deixar-me ver se acerto: Einstein concluiu que a gravidade poderia curvar a trajetória da luz!?

Isso mesmo!

Mas como seria possível curvar a trajetória da luz?

Einstein propôs que uma massa muito grande, causa deformação no espaço-tempo, da mesma forma que uma bola "pesada" deforma a superfície e um lençol esticado.

Na verdade, a luz estaria apenas acompanhando o espaço-tempo deformado.

Foi isto que os cientistas observaram no eclipse de Sobral?

Exatamente

FIM

Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 7

Momento de discussão e partilha entre os alunos e professor sobre o conteúdo da última página da HQ, relacionada inicialmente como o conteúdo no recorte do jornal de Londres, apresentado na primeira página da HQ (Figura 3). Comenta-se sobre o que se entendeu ou gerou dúvidas por parte dos alunos.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: curvatura do espaço-tempo

Texto para os alunos: Curvatura do espaço-tempo¹⁵

O princípio da equivalência torna-se contundente quando aplicado à luz. Imagine, por exemplo, um observador segurando uma lanterna dentro de um elevador. Supondo-se que o elevador despenque em queda livre e num certo momento da queda a lanterna é ligada. O Observador (O_2) dentro do elevador, cai com a lanterna e vê um raio de luz que segue em linha reta, cruza o elevador e bate na parede da frente, conforme ilustrado na parte central da HQ dessa aula, na figura a esquerda. Até aí, nada de mais.

Mas se outro observador externo (O_1), parado em relação ao chão, pudesse enxergar através das paredes do elevador, o que veria? Na figura central da HQ à direita, temos a visão desse observador.

Nota-se que para O_1 o raio de luz literalmente encurva! Neste caso, sabemos que a causa dessa curvatura é o movimento acelerado do elevador. Mas, pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito poderia ser conseguido a partir de um campo gravitacional externo. Einstein concluiu, a partir desse raciocínio, que a gravidade deveria forçar a luz a fazer curva!

É a partir daí que surge a interpretação geométrica para os efeitos da gravidade. Podemos considerar que corpos com grande massa provocam uma curvatura no espaço-tempo ao seu redor. Dessa forma, mesmo a luz, caminhando supostamente em uma linha reta, deveria acompanhar a curvatura do espaço-tempo, como que sofrendo a ação atrativa da gravidade.

¹⁵ Continuação do texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.

Segundo Einstein, corpos com grande massa, como estrelas, por exemplo, poderiam tirar a luz de sua suposta e previsível trajetória retilínea.

Mais uma vez surge a importante pergunta: como testar a teoria? Como vamos conseguir um corpo de massa estelar aqui na Terra? Impossível!

Novamente entra em cena a criatividade dos cientistas. Uma oportunidade importante para testar a teoria é um eclipse solar total. A ideia é fotografar as estrelas visualmente próximas ao Sol e que só aparecem quando o disco solar é encoberto pela Lua, no curto período em que o dia vira noite, na totalidade do eclipse. Numa outra época do ano, quando essa mesma constelação estiver visível à noite, sem a presença do Sol, uma segunda exposição fotográfica pode ser feita.

Nessa segunda foto, as posições das estrelas devem ser ligeiramente diferentes daquelas obtidas durante o eclipse, pois desta vez, sem o Sol, a luz chega até a máquina fotográfica em linha reta. Se conseguirmos medir essas mínimas diferenças nas posições das estrelas, então fica provado que na presença do Sol desvia, de fato, a luz! Genial, não?

Atividade 5 – Apresentar o vídeo sobre o princípio da equivalência e curvatura da luz

Sugere-se assistir ao vídeo 1, cujo *link* está disponível nos materiais complementares. O vídeo faz um resumo sobre o princípio da equivalência e a curvatura da luz.

Atividade 6 – Questionário avaliativo para os alunos responder e entregar

Os alunos responderão o questionário avaliativo final do Produto Educacional. As respostas esperadas estão em azul seguidas após cada questão.

1 – Desprezando a resistência do ar e considerando que uma bola de boliche e uma maçã são abandonadas da mesma altura, quem chega no chão primeiro?

Ambas chegam ao mesmo tempo.

2 – De acordo com a teoria da relatividade o que ocorre com o tamanho de um objeto, caso ele esteja em movimento com velocidade próxima a da luz?

Tem seu tamanho diminuído, contraído, para o observador em repouso.

3 – De acordo com a teoria da relatividade o que ocorre com a marcação do tempo de um objeto quando estiver em movimento com velocidade próxima a da luz?

O tempo é marcado lentamente, passa devagar, ou seja dilata, para o observador em repouso.

4 – O que define o limite entra a física clássica de Newton e a teoria da relatividade?

O objeto estar em movimento com velocidade muito alta, próxima a velocidade da luz.

5 – Qual a trajetória mais provável para o movimento de um feixe de luz.

Em linha reta, porém, acompanhando a curvatura do espaço-tempo.

6 – O que você sabe sobre Buraco Negro?

O efeito de deformação do espaço-tempo nas proximidades de um objeto com muita densidade de massa, produzindo um campo gravitacional de tamanha intensidade onde a velocidade de escape seja maior do que a velocidade da luz. Dessa forma, nem a luz consegue escapar da ação do campo gravitacional (daí o nome buraco negro).

7 – Qual o motivo de não percebermos os efeitos da teoria da relatividade em nosso cotidiano?

As velocidades que presenciamos são infinitamente menores que a velocidade da luz.

8 – Você é capaz de citar uma aplicação cotidiana da teoria da relatividade?

Aparelho/aplicativo de GPS.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “Como a gravidade deforma o tempo? Relatividade Geral” – YouTube – Duração: 17min37s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=56TJuxnWC-c&t=3s>>. Acesso em: 23/05/2022.

- VÍDEO 2 – “Relatividade Geral Explicada em 7 Níveis de Dificuldade” – YouTube. Duração: 6min53s. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=As-dDpwEnqU>>. Acesso em 25/03/2022.

- VÍDEO 3 – “Para finalmente entender a Teoria da Relatividade de Albert Einstein” – YouTube – Duração: 3min43s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fwzzgJOLZkM&t=121s>>. Acesso em : 18/07/2022.

- VÍDEO 4 – “Relatividade geral: O ESPAÇO-TEMPO CURVO” – YouTube – Duração: 7min15s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=A7BiPY9vuQI>>. Acesso em: 19/07/2022.

- TEXTO 1 – “Porquê espaços-tempo curvos? Gravidade como curvatura do espaço-tempo”. Disponível em: <<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node8EspCurvos.html>>. Acesso em: 23/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

UNIDADE DIDÁTICA 8

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO QUESTIONÁRIO E AVALIAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Atividade 1 – O principal objetivo desta aula é realizar com os estudantes a devolutiva, quanto ao rendimento que obtiveram no questionário avaliativo final, realizado na aula anterior. Discutir sobre as possíveis respostas equivocadas e retomar tópicos importantes quando necessário.

Atividade 2 – Outra finalidade da aula é realizar uma avaliação da proposta apresentada para a abordagem do tema sobre tópicos da teoria da relatividade. Os alunos são convidados e motivados a responder as seguintes questões, de maneira livre e informal, para que as respostas correspondam à realidade da mudança no conhecimento individual de cada um.

1 – O professor demonstrou domínio do conteúdo e as explicações foram claras.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

2 – Os objetivos das aulas foram bem definidos, ficando bem claros aos alunos.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

3 – Os recursos metodológicos (quadrinhos, imagens, vídeos, simulações) ajudaram para uma melhor aprendizagem.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

4 – Por meios das aulas, os alunos conseguiram entender os aspectos básicos sobre a teoria da relatividade.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

5 – A abordagem do conteúdo sobre teoria da relatividade é importante para os alunos da educação básica, em especial, no ensino médio.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Produto Educacional objetivou o desenvolvimento de uma proposta de abordagem da curvatura do espaço-tempo da teoria da relatividade, partindo sempre de fatos, não necessariamente corriqueiros aos alunos e utilizando como ferramenta didática uma história em quadrinhos. Por meio do lúdico, buscou-se envolver os alunos despertando o interesse pelo assunto.

A cada unidade didática da SD, utilizou-se uma dinâmica de questionamentos visando conduzir os alunos à quebra de paradigmas entre a teoria clássica newtoniana e a teoria da relatividade, em analisar as variáveis envolvidas no estudo de um movimento e no entendimento da gravidade.

Procurou-se realizar a contextualização histórica que levou à teoria da relatividade e, uma vez que a SD foi sempre motivada por uma HQ, tornou-se fácil assimilar elementos da componente curricular de Arte na proposta. Mesmo não sendo prioridade no trabalho, foram apresentadas e realizadas operações matemáticas, ressaltando-se que o esperado pelos alunos era que eles expressassem a aprendizagem por meio de desenhos e atividades lúdicas, como cruzadinhas e caça-palavras.

Espera-se que este material contribua de alguma forma com os professores de física do Ensino Médio, quando trabalhado o tema da teoria da relatividade. Fica a critério de cada professor a melhor maneira de utilização do PE, podendo ser: a utilização na íntegra, optando-se por elementos da teoria da relatividade restrita ou geral, ou até mesmo, apenas a abordagem de aspectos históricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Denise Lino de. O que é (e como faz) sequência didática? **Entrepalavras**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 322-334, maio 2013. ISSN 2237-6321. Disponível em: <<http://www.entrepalavras.ufc.br/revista/index.php/Revista/article/view/148/181>>. Acesso em: 20 mar. 2023.

AUSUBEL, David P.; NOVAK, Joseph D.; HANESIAN, Helen. **Psicologia Educacional**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Interamericana Ltda. 1980.

BERTOLINI, Nivaldo. **Uma abordagem da curvatura espaço-tempo da teoria da relatividade por meio de quadrinhos**. Dissertação de mestrado profissional do Programa de Pós-graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) do Departamento de Física (DFI) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), 2023. Disponível em: <<http://www.dfi.uem.br/dfimestrado/?q=node/57>>.

BRASIL. Ministério da Educação. **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em 12/09/2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/imagens/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf>. Acesso em 13/03/2022.

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

DOLZ, Joaquim; NOVERRAZ, Michèle; SCHNEUWLY, Bernard. **SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS PARA O ORAL E A ESCRITA: APRESENTAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO**. 2004. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5794503/mod_resource/content/1/DOLZ%3B%20NOVERRAZ%3B%20SCHNEUWLY.%20Sequ%C3%A7%C3%A3o%20de%20sequ%C3%Aancias%20did%C3%A1ticas%20para%20o%20oral%20e%20para%20a%20escrita%20apresenta%C3%A7%C3%A3o%20de%20um%20procedimento.pdf>. Acesso em 17/05/2023.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Ótica e Física Moderna**. v. 4, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

LOVETRO, José Alberto. Quadrinhos - a linguagem completa. **Comunicação & Educação, [S. l.]**, n. 2, p. 94-101, 1995. DOI: 10.11606/issn.2316-9125.v0i2p94-101. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/comueduc/article/view/36141>. Acesso em: 12 maio. 2023.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A origem histórica da relatividade especial**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

MOREIRA, Marco Antonio; MASINI, Elcie F. Salzano. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Centauro, 2001.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem**. 2 ed. ampl. São Paulo: E.P.U., 2014.

MENEZES, Luiz Carlos de. **A Matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico**. 1 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

NASCIMENTO, Nicolas. L. N. S.; CUZINATTO, Rodrigo. R.. Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica. **Revista**

Brasileira de Ensino de Física, v. 44, p. e20220004, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0004>>. Acesso em 16/04/2023.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

OLIVEIRA, Marina Aparecida Ferreira de. **Utilizando um fenômeno físico para medir o diâmetro de um fio de cabelo**. Orientador: Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Física, Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, 2016. Disponível em: <<http://www.dfi.uem.br/dissertacao/mnpef/uem.php>>. Acesso em 15/08/2020.

PARANÁ. **Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física**. Curitiba: SEED, 2008.

PARANÁ. **Referencial Curricular Para o Ensino Médio do Paraná**. Curitiba: SEED, 2021.

RIBEIRO, R. J., SILVA, S. de C. R. da., e KOSCIANSKI, A.. Organizadores prévios para aprendizagem significativa em física: o formato curta de animação. **Ensaio Pesquisa Em Educação Em Ciências (Belo Horizonte)**, 14 (Ens. Pesqui. Educ. Ciênc. (Belo Horizonte), 2012 14(3)). Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1983-21172012140311>>, acesso em 21/02/2023.

SANTOS, R. E. dos. Aplicações da História em Quadrinhos. **Comunicação & Educação, [S. l.]**, n. 22, p. 46-51, 2001. DOI: 10.11606/issn.2316-9125.v0i22p46-51. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/comueduc/article/view/36995>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

VERGUEIRO, Waldomiro. Uso das HQs no ensino. Em: **Como usar as histórias em quadrinhos na sala de aula**. VERGUEIRO, Waldomiro (org). 4 ed. São Paulo: Contexto, 2020. p. 7-29.

VILELA, Túlio. Os quadrinhos na aula de História. Em: **Como usar as histórias em quadrinhos na sala de aula**. VERGUEIRO, Waldomiro (org). 4 ed. São Paulo: Contexto, 2020. p. 105-129.

ZABALA, Antoni. **A prática educativa: como ensinar**. Tradução Ernani F. da F. Rosa. Porto Alegre: Artmed, 1998.

APÊNDICE I – Material do aluno

A finalidade deste Apêndice é oferecer uma apostila como material para que os alunos acompanhem as aulas. A intenção é que a cada aula os alunos recebam uma das páginas/aulas e realizem as atividades propostas. Ao término eles possuirão a história em quadrinhos completa, juntamente com todos os textos de apoios, atividades e sugestões de vídeos.

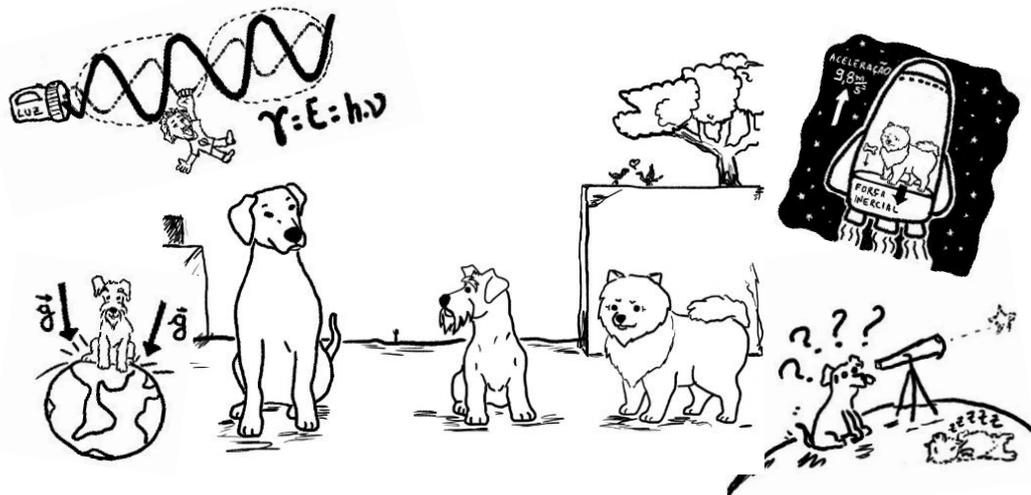
O material do aluno foi diagramado para ser impresso em frente e verso, para tanto, deixou-se de seguir as normas da ABNT.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ - DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO
DE FÍSICA - POLO 20

MATERIAL DO ALUNO

A CURVATURA ESPAÇO-TEMPO DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS: VAMOS CONHECER?

Autores:
NIVALDO BERTOLINI
BRENO FERRAZ DE OLIVEIRA
HATSUMI MUKAI



Maringá – PR - 2023

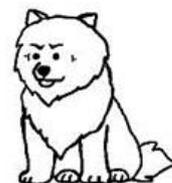
APRESENTAÇÃO

Olá querido(a) estudante! Iremos realizar pelas próximas páginas um pequeno passeio buscando conhecer um pouco sobre a teoria da relatividade proposta por Albert Einstein. Para isso, teremos a companhia de três cachorrinhos com personalidades bem diferentes, que irão auxiliar em nossa aventura pelo conhecimento.



Duque: um Vira-lata grandão e simpático, amigo e muito curioso, que apesar de não conhecer muito de ciências, adora aprender coisas novas.

Ben: um Spitz Alemão (lulu da Pomerânia) impicante, ranheta e que adora questionar tudo. Apesar do gênio forte é um grande amigo e está sempre presente.



Bob: um Schnauzer muito carinhoso, amigo e que adora observar e aprender. Sempre partilha seus conhecimentos com os amigos e deseja que todos aprendam mais.

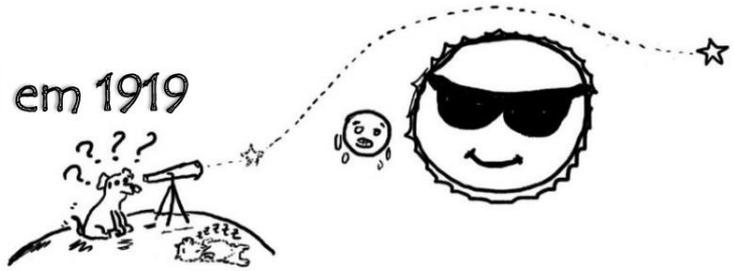
O desenho e a utilização das caricaturas das pessoas foram autorizadas por elas.

Qualquer semelhança de nomes e situações foi mera coincidência.

Aproveitem o passeio pelo mundo fascinante da teoria da relatividade, divirtam-se e que ao final, espero que consigam compreender as bases desta desafiadora teoria.



O eclipse de Sobral em 1919



O ECLIPSE SOLAR DE MAIO E OS SCIENTISTAS — Londres, 8 (H.) — Os resultados obtidos pela missão que foi ao Ceará e à Ilha do Príncipe observar o eclipse solar de Maio último estão causando o mais vivo interesse nos círculos científicos, porque esses resultados vêm confirmar uma das leis de deflexão do professor suíço Einstein, cujas novas theories sobre o universo não admitem as leis de Newton.



O ECLIPSE SOLAR DE MAIO E OS SCIENTISTAS — Londres, 8 (H.)
Os resultados obtidos pela missão que foi ao Ceará e a Ilha do Príncipe observar o eclipse solar de Maio último estão causando o mais vivo interesse nos círculos científicos, porque esses resultados vêm confirmar uma lei de deflexão do professor suíço Einstein, cujas novas theories sobre o universo não admitem as leis de Newton¹⁶.

¹⁶ Reportagem “Há 100 anos, eclipse em Sobral pôs Einstein e Teoria da Relatividade na História” de 25/05/2019. Disponível em: <https://img.estadao.com.br/thumbs/640/resources/jpg/2/7/1559067116972.jpg>. Acesso em 13/04/2022.

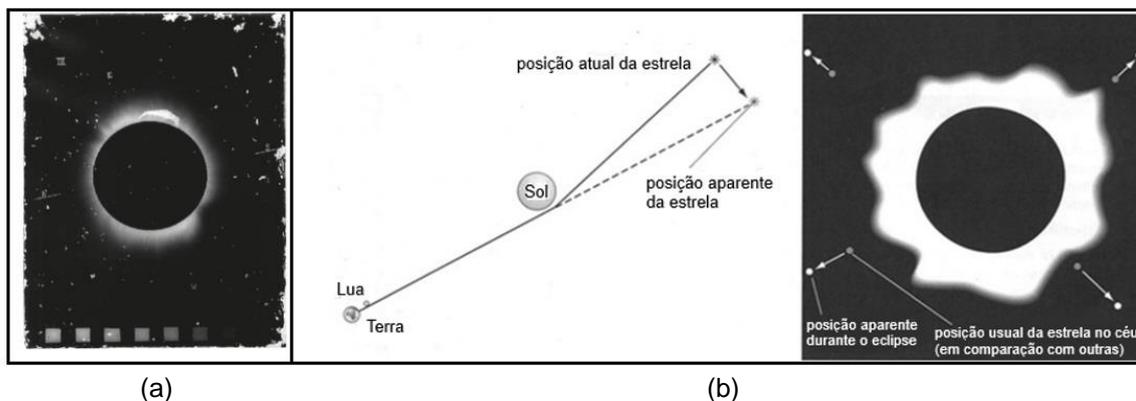
O ECLIPSE DE SOBRAL

Nos anos de 1905 e 1915, Albert Einstein publicou dois artigos que tratavam, respectivamente, da teoria da relatividade restrita e da teoria da relatividade geral. Suas ideias não foram de pronto entendidas e aceitas pela comunidade científica. Muitas dúvidas cercavam a nova teoria que contrariava o que já era conhecido e aceito pela física newtoniana a respeito do espaço, tempo e gravidade. Além disso, um dos fatores que não colaboravam com sua aceitação estava na dificuldade de realizar demonstrações experimentais.

A teoria da relatividade geral apresentava uma nova compreensão para os efeitos da gravidade. Enquanto a teoria clássica de Newton atribuía à gravidade uma interação inversa ao quadrado da distância entre massas, Einstein propunha que a gravidade seria o efeito da deformação do espaço-tempo na presença de uma grande massa (o Sol, por exemplo). A luz, do ponto de vista clássico, por ser composta por partículas (fótons), que não possuem massa, percorreria sempre uma trajetória retilínea, não sendo influenciada pela ação da gravidade e no contexto da teoria da relatividade, a trajetória da luz acompanharia a deformação do espaço-tempo provocado pela presença de um astro massivo.

Em maio de 1919, duas expedições de cientistas ingleses se deslocaram, uma para a cidade de Sobral no Brasil, outra para a Ilha do Príncipe, na África, para a realização de observações de um eclipse que permitiria visualizar estrelas durante os minutos que o Sol estivesse encoberto. O resultado obtido pela expedição que estava na África foi comprometido devido ao tempo estar nublado. A equipe que esteve presente em Sobral, no dia 29 de maio, conseguiu fotografar o eclipse e, conseqüentemente, várias estrelas em torno do Sol (Figura 1). Análises posteriores mostraram que as posições das estrelas nas fotos apresentavam desvios de suas reais posições. Os cálculos do desvio sofrido na trajetória da luz estavam de acordo com as estimativas da teoria da relatividade geral de Einstein.

Figura 1 – (a) Foto do eclipse de Sobral em 1919. (b) Esquema do desvio sofrido pela luz nas proximidades do Sol.



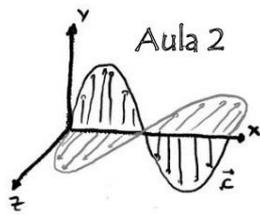
Fonte: (a) <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/3cQFXzYr5Fs8V7yKMVtzgQc/?lang=pt#ModalFig04>
(b) <https://www.scielo.br/j/rbef/a/7xnCndqcq78pSNZzpbkvrRr/?lang=pt#ModalFig1> (créditos: Arthur Eddington). Tradução do autor. Acesso em 07/04/2022.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “Eclipse de Sobral: O dia em que o Brasil ajudou a confirmar a teoria da relatividade de Einstein” - YouTube. Duração: 9min26s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 31/05/2022.

- VÍDEO 2 – “5 Coisas sobre a Teoria da Relatividade - 100 anos de Sobral” - YouTube. Duração: 15min39s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 02/06/2022.

- TEXTO 1 – “O eclipse de Sobral: como a Teoria da Relatividade foi comprovada no Ceará” – Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/o-eclipse-de-sobral-como-a-teoria-da-relatividade-foi-comprovada-no-ceara/>>. Acesso em 01/06/2022.



Aula 2



ELETROMAGNETISMO X MECÂNICA CLÁSSICA



Vamos brincar com um carrinho!

Nós podemos facilmente somar velocidades, por exemplo, o Duque que está em movimento com o carrinho (referencial S') observa o Ben em movimento com velocidade \vec{u}' . Eu que estou fora do carrinho (referencial S) em repouso, observo o Ben com velocidade \vec{u} , em que, $\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}$.



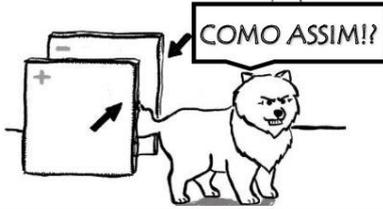
Agora, uma situação para entender o problema que surgiu com a teoria do eletromagnetismo (*)...



Veja só Duque: para você que está sentado no carrinho, as placas eletrizadas estão em repouso.

Neste caso, como os sinais das cargas são diferentes, você irá perceber a força elétrica de atração entre as placas.

Caso a gente coloque a calça do Ben entre as placas, ela será amassada.

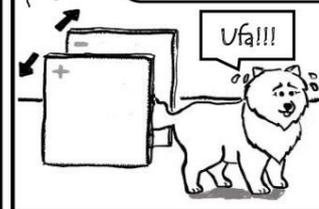


COMO ASSIM!?

Eu vejo que as placas estão em movimento. Neste caso, o movimento produz um campo magnético ao redor das placas...



...surgindo uma força magnética repulsivas, não amassando a calça do Ben.



Ufa!!!

Agora não entendi! A calça do Ben será amassada ou não?



Na teoria do eletromagnetismo, ao mudar o referencial, o evento físico também pode mudar! Como pode, um observador ver a calça do Ben amassada e outro não, ao mesmo tempo?



Como resolvemos este problema, sabichão?



Você conhece a teoria da relatividade?



(*) Adaptação do autor, da exemplificação feita por Luis Carlos de Menezes em forma de texto, no livro "A matéria, uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento física" (Editora Livraria da Física, 2005, p. 120).

REFERENCIAL E MOVIMENTO

Um evento físico é algo que pode ser analisado e mensurado por suas informações de espaço e tempo. A análise pode ser realizada por observadores que se encontram em referenciais distintos, ou seja, possuem pontos de vista diferentes, sem, entretanto, mudar o evento.

Por referenciais inerciais definimos os sistemas de coordenadas que estão em repouso ou em movimento em linha reta com velocidade constante, um em relação ao outro.

A mecânica newtoniana utiliza um conjunto de equações denominadas transformações de Galileu para encontrar os valores das grandezas físicas em referenciais inerciais distintos. Considerando dois referenciais espaciais cartesianos (x , y e z) e a temporal (t), um S em repouso e outro S' com velocidade constante em relação ao primeiro, o movimento apenas na coordenada x pode ser descrito da seguinte maneira:

$$x' = x - v \cdot t; \quad (1a)$$

$$y' = y; \quad (1b)$$

$$z' = z; \quad (1c)$$

$$t' = t, \quad (1d)$$

como ilustrado no quadro 1 da página da HQ da Aula 2.

Da mesma forma, é possível uma transformação entre os valores das velocidades relativas para observadores em ambos os referenciais:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v} \quad (2a)$$

ou,

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}. \quad (2b)$$

Todo evento físico é analisado e entendido a partir de referenciais que se adotam para mensurar suas variáveis. Ao estudar o movimento dos corpos deve-se ter em mente as noções de espaço, tempo e a massa do objeto que se move. Da mesma forma, o evento físico observado deve manter uma coerência para referenciais diferentes. Não se pode mudar o evento físico em si,

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “O Conflito com a Mecânica Clássica” (livro digital) – Disponível em: <<https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504254>>. Acesso em: 19/07/2022.

apenas pelo fato de ser analisado por outro referencial.

A teoria do eletromagnetismo de Maxwell, aliada aos resultados experimentais de Michelson e Morley, mostrava que a velocidade da luz não seguia a regras da física newtoniana. O valor da velocidade da luz se mantém constante para todos os observadores, em todos os referenciais, independentemente do movimento da fonte, podendo acontecer que um evento físico seja percebido de formas diferentes em referenciais também diferentes.

A teoria da relatividade proposta por Einstein apresenta uma solução para os conflitos entre a teoria newtoniana e o eletromagnetismo.

Atividade de fechamento da aula

Chegou o momento de realizarmos algumas atividades para testarmos os conhecimentos adquiridos.

1) Realize uma pesquisa *online* sobre o significado das seguintes palavras:

- **Absoluto:**

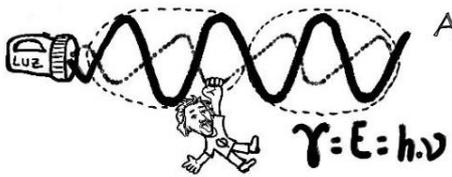
- **Relativo:**

- **Referencial:**

2) A velocidade de um objeto em movimento pode apresentar valores distintos para observadores diferentes. O que determina essa diferença de velocidade para os vários observadores?

3) No primeiro quadro da historinha de hoje, considere a velocidade do Ben observada pelo Bob com o módulo de 4 m/s, ao mesmo tempo em que o Duque observa o Ben com velocidade 2,5 m/s. Qual será a velocidade do carrinho?

- TEXTO 2 – “Introdução a Teoria da Relatividade” - Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4394955/mod_resource/content/0/Intro-Relatividade_SRM_EFC-2015_v3.pdf>. Acesso em: 19/07/2022.



AULA 3

OS POSTULADOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Bob, explique a teoria da relatividade.

Vamos falar novamente sobre o eletromagnetismo de Maxwell.

Ele concluiu que a luz é uma onda eletromagnética que se move com velocidade $c = 300.000 \text{ km/s}$.

Na época de Maxwell os cientistas acreditavam que a onda eletromagnética necessitaria de um meio privilegiado, chamado éter, para se propagar, em que a velocidade teria o valor "c".

UAAUUU

Deixa ver se entendi: a partir deste tal de éter seria possível somar velocidades como fizemos ao brincar com o carrinho?

Exatamente! Vários experimentos foram realizados na época para provar a existência do éter. Porém, nenhum deu certo. Independente do movimento da fonte de luz, quem está se movendo com a fonte ou quem está em repouso em relação a ela, observa a luz com a velocidade igual.

Como assim?

Onde entra o Einstein na história?

Ele propôs dois postulados, para tentar resolver o problema:

1º postulado: as leis da física são iguais para todos os referenciais inerciais.

2º postulado: independente do movimento da fonte, a velocidade da luz é constante para todo referencial inercial.

Por que tenho a impressão que isso vai dar problema?

A VELOCIDADE DA LUZ

A grande maioria dos cientistas, no final do século XIX, acreditavam ser necessária a existência do éter no espaço, como o referencial privilegiado em que a luz teria seu valor $c = 300.000.000 \text{ m/s}$, conforme o previsto na teoria eletromagnética proposta por Maxwell. Acreditava-se também, na possibilidade de medir a velocidade da Terra em relação ao éter, somando velocidades,

conforme a física clássica/transformações de Galileu, equações (2.1a) e (2.1b).

O segundo quadrinho central da HQ menciona que várias tentativas de se provar a existência do éter foram realizadas. A mais famosa consiste no experimento de Michelson e Morley, em 1887, por meio de um aparato experimental denominado interferômetro. O experimento consiste em um feixe de luz dividido em outros dois que percorrem direções perpendiculares. Uma das direções

seria coincidente ao movimento de translação da Terra; a outra direção, como já dito, perpendicular a esse movimento. Após percorrerem distâncias iguais (os braços do interferômetro), os feixes separados incidem em espelhos, refletindo e se recombinando novamente. O feixe que está na mesma direção do movimento da Terra sofreria o efeito contrário do vento do éter, reduzindo sua velocidade. A menor velocidade provocaria uma diferença do tempo de propagação desse feixe em relação ao outro, que por sua vez seria percebida pelo interferômetro.

Apesar da precisão do aparelho, não foram encontradas evidências da existência do éter. Outra informação importante realizada foi a constância da velocidade da luz, independentemente da orientação do aparelho durante a realização das medidas.

Com base nos resultados negativos encontrados quanto ao éter, Einstein rompe definitivamente com a ideia de sua existência, ao mesmo tempo que propõem os dois postulados da teoria da relatividade restrita.

1.º postulado: para todos os referenciais inerciais, as leis da Física serão sempre as mesmas.

2.º postulado: a velocidade da luz é constante para qualquer referencial inercial.

O segundo postulado apresenta a luz com uma velocidade limite c , ao mesmo tempo, como uma constante da natureza. Independentemente de quem estiver

observando a fonte de luz em repouso, em seu referencial ou em movimento em um referencial, com velocidade constante, o valor de $c = 300.000.000 \text{ m/s}$, ela permanecerá inalterada, fato ilustrado no primeiro quadrinho central da HQ.

Um modelo de interferômetro foi utilizado para demonstrar experimentalmente a existência de ondas gravitacionais. Como um objeto massivo é capaz de produzir deformação na estrutura espaço-tempo, também poderia produzir ondulações quando em movimento. A confirmação da existência das ondas gravitacionais foi publicada no início de 2016; no entanto, a sua comprovação ocorreu em 2015 por meio do LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), em Washington e na Lousiana, que detectou os resultados da colisão de buracos negros. (NASCIMENTO, CUZINATTO. 2022, p. 2).

Atividades de fechamento da aula

1) Primeiramente, pesquise o significado da palavra **Postulado**.

2) Utilizaremos o aplicativo de *Physics at school* instalado no smartphone, para analisar os resultados do experimento de Michelson e Morley.

Vídeo

Para conclusão da aula, assistir o vídeo, seguido por um momento de comentários com a turma.

VÍDEO: *O Espaço-Tempo Explicado*.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kJ5xNaSleTI>>.

Duração: 11min58s.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “*Introdução experiência de Michelson-Morley - A relatividade especial - Física - Khan Academy*” - YouTube. Duração: 8min36s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bv2ataBdQ78>>. Acesso em: 07/07/2022.

- TEXTO 1 – “*O Experimento de Michelson-Morley*” – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/o-experimento-de-michelson-morley/>>. Acesso em: 05/06/2022.



Aula 4

DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Bob, o que muda com os postulados de Einstein?

Vamos começar pela física clássica.

A ideia mais simples que podemos ter sobre velocidade é a divisão entre um deslocamento e o tempo que foi gasto.

$$v = \frac{d}{t}$$

Duas pessoas podem medir valores diferentes de velocidades em referenciais diferentes. Igual na brincadeira com o carrinho que fizemos. Neste caso, a velocidade é relativa.



Para mim você está enrolando, já sabemos de tudo isso.

Calma... Outra coisa importante: independente do observador, 1 metro e 1 segundo é sempre igual para todos, ou seja, são absolutos.

Temos então o problema: para a velocidade da luz ser constante, ou seja, absoluta, em todos os referenciais inerciais, o espaço e o tempo devem ser relativos.

Não estou acreditando no que estou ouvindo!

Para velocidades próximas a da luz temos fenômenos que vão contra nosso senso comum e são chamados de dilatação do tempo e contração do espaço.

É sério o que você está falando? O tempo demora mais para passar e o tamanho das coisas diminuem?

Tudo papo furado. Nem tem como provar isso.

Tem sim. Inclusive nós utilizamos a relatividade com frequência no aparelho de GPS.

DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

A velocidade é uma grandeza física que relaciona o tempo necessário para que um objeto saia de uma posição e chegue a outra, realizando um deslocamento. Na mecânica clássica de Newton, é possível que observadores em referenciais inerciais distintos verifiquem valores diferentes para a velocidade do objeto em movimento. A relação dentre os valores encontrados se dá

por meio das transformações de Galileu (equações 1a – 1b).

O segundo postuldo da teoria da relatividade propõe que a velocidade da luz é sempre igual para qualquer referencial inercial, ou seja, seu valor é absoluto e, para que isso se torne possível, o espaço e o tempo devem ser relativos. Tem-se assim, os efeitos da dilatação do tempo e a contração do espaço. Um relógio se movendo próximo a

velocidade da luz marcaria o tempo lentamente quando comparado a outro em repouso. Já uma régua teria suas dimensões comprimidas na mesma situação.

A dilatação do tempo e a contração do espaço são os aspectos que mais desafiam o senso comum quando se trata da teoria da relatividade.

Consideram-se dois observadores, O_1 em um referencial R em repouso e outro, O_2 em repouso num referencial R' , um trem por exemplo (Einstein utilizava muitos trens como exemplos), com velocidade constante v muito grande, próxima a velocidade da luz (v aproximadamente igual a c). Cada observador medirá o tempo de forma diferente em seu referencial quando comparados, sendo que o observador em movimento relativo observará o tempo passando mais devagar. A diferença entre os tempos medidos será dada pela expressão:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \quad (3)$$

Vídeo

Sobre a aplicação da teoria da relatividade, mais especificamente sobre a dilatação do tempo, no funcionamento de GPS, assistir a vídeo:

VÍDEO: *GPS, como funciona?*

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qzOA41vA8Qw&t=6s>>.

Duração: 7min36s.

Atividades de fechamento da aula

1 – Observar valores da dilatação do tempo por meio da equação X.3, conferindo os valores com o simulador e calculadora *online* da página Walter Fendt na *internet*.

- Simulador: <https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm>.

- Calculadora: <https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm>.

2 – Desafio para os alunos: desenharem, mesmo que desenhos simples, algo representando a dilatação do tempo e a contração do espaço.

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “Uma proposta de inserção da teoria da relatividade restrita no Ensino Médio via estudo do GPS”. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/rbef/a/ZR35rghCQxRq6rp9t7MsDvs/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 17/07/2022.

em que γ (letra grega gama) é chamado fator de Lorentz, dado por:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

Vamos considerar, agora, que no trem haja uma barra em repouso e com seu comprimento na direção do movimento do trem. Cada observador perceberá a barra com um comprimento diferente, sendo menor para o observador em repouso. A relação entre os diferentes comprimentos é dada pela expressão:

$$L = \frac{L'}{\gamma} \quad (5)$$

O comprimento L' é chamado de comprimento próprio e consiste no tamanho percebido pelo observador em repouso relativo à barra.

Mesmo contrariando o senso comum, o efeito da dilatação do tempo é utilizado para que o aparelho/aplicativo de GPS (*Global Positioning System*) funcione adequadamente.

O PARADOXO DOS GÊMEOS

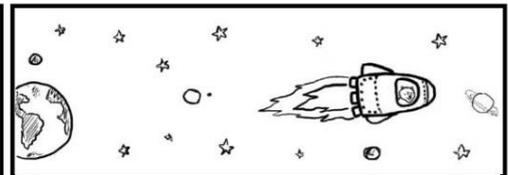


Estou com dificuldade de entender essa história de contração do espaço e dilatação do tempo.

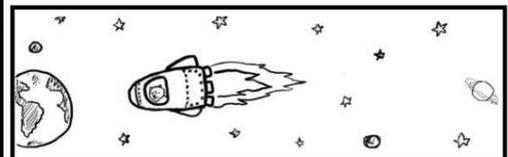
Tem uma situação que é utilizada para ajudar na compreensão da dilatação do tempo: o Paradoxo dos Gêmeos.

Vamos imaginar que o Ben tivesse um irmão gêmeo que fosse participar de uma missão espacial muito longe da Terra.

Sabia que iria sobrar pra mim.



A nave viaja com 90 % da velocidade da luz e demora 4 anos para concluir a viagem e retornar!



Utilizando a equação da dilatação temporal teremos que para o Ben, que ficou na Terra, passaram-se aproximadamente 9 anos.

Quer dizer que meu irmão estará 5 anos mais novo?

Nossa! Mas isso não acontece realmente?

Acontece sim. Inclusive é por meio da dilatação do tempo que os cientistas explicam como as partículas "múons" conseguem atingir a superfície da Terra, mesmo não apresentando tempo de vida média suficiente para isso.

O que é isso de múons

A física de partículas estuda as menores parcelas de matéria que formam tudo que conhecemos. As partículas que mais ouvimos falar são os prótons, nêutrons e elétrons. Os múons são outros exemplos assim como os fótons que são partículas de luz.

Pra variar, só enrolação... E o tal de "desvio da luz" das estrelas?

OS MÚONS¹⁷

Um problema bastante comum em relatividade restrita é o que envolve o caso das partículas de altas energias, também chamados raios cósmicos. Na verdade, estamos interessados no que ocorre numa partícula que é um produto da interação dos raios cósmicos com a atmosfera da Terra. Os Múons (cujo símbolo é a letra grega μ) são classificados em física de partículas como Léptons, do grego leve. Temos como exemplo o elétron, o tau e os neutrinos.

Os raios cósmicos que geralmente são constituídos de prótons altamente energéticos, penetram na atmosfera da Terra e chocam-se com as moléculas de ar. Desse choque entre prótons energéticos e as moléculas da atmosfera, outras partículas se formam, como exemplos os píons e os káons. Múons que são partículas elementares e geralmente decaem em um elétron, um neutrino do múon (ν_μ) e num antineutrino do elétron (ν_{e^-}).

O tempo de vida de um Múon é de aproximadamente $2,2 \mu\text{s}$ ¹⁸. Tempo esse medido em seu referencial, ou seja, com o Múon em um laboratório por exemplo, possuindo baixa velocidade.

Grande parte dos múons são criados a uma altitude de aproximadamente 15 km possuindo uma velocidade da ordem de $0,9998c$ (c = velocidade da luz no vácuo = $3 \cdot 10^8$ m/s). Esta alta velocidade faz com que o seu tempo de vida no sistema de referencial do laboratório seja dilatado permitindo que a maioria alcance a superfície da Terra.

Pensando em um movimento com velocidade próxima à velocidade da luz para os Múons, e calculando a distância percorrida ao entrarem na atmosfera usando a equação da velocidade $v = \Delta \frac{s}{t}$, para $v = c$, isolando o deslocamento Δs :

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$
$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot (2,2 \cdot 10^{-6}) \Delta s = 660m$$

Como é possível, então, que múons percorram apenas 660m atmosfera adentro, e, ainda assim, sejam detectados próximos da superfície da Terra, que fica a aproximadamente 10.000 metros mais distante do que o Múon pode percorrer?

O tempo de vida do Múon dilata-se em relação ao referencial do laboratório que está em Terra. Pode-se calcular essa dilatação aplicando as equações 2.3 e 2.4,

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

em que $\Delta t' = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{s}$ (tempo próprio do múon) e $v = 0,9998c$. Assim:

$$\Delta t = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{0,9998^2 c^2}{c^2}}}$$
$$\Delta t = 110 \mu\text{s}.$$

Um resultado que faz com que o Múon relativístico leve mais tempo para decair.

Uma sugestão é conferir o resultado utilizando a calculadora da página Walter Fendt (https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm).

Utilizando esse valor de vida e aplicando novamente,

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$
$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot 110 \cdot 10^{-6}$$
$$\Delta s = 33.000 \text{ m}.$$

O que dá como resultado uma distância suficiente para ser detectada ao chegar próximo da superfície da Terra. Mostrando assim, que há uma dilatação do tempo em $107,8 \mu\text{s}$, possibilitando um deslocamento 50 vezes maior que o esperado em laboratório, comprovando, assim, o previsto pela teoria da relatividade.

¹⁷ Texto adaptado do original: “Múon Relativístico” – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 05/06/2022.

¹⁸ A letra grega μ (lê-se micro) também é utilizada para representar a notação científica 10^{-6} , como nesse caso.

Atividades de fechamento da aula

1 - (UEL PR) A Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, mas em perfeito acordo com os resultados experimentais. Ela é aplicada, entretanto, somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, válida não só para referenciais inerciais, mas também para referencial não-inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, consideram as seguintes afirmativas:

I. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade constante.

II. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade variável.

III. Observadores em referenciais inerciais diferentes medem a mesma aceleração para o movimento de uma partícula.

Assinale a alternativa correta

- A) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- B) Apenas a afirmativa II é verdadeira.
- C) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- D) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- E) As afirmativas I e III são verdadeiras.

2 - (CFT-CE) Em 2005, Ano Mundial da Física, comemora-se o centenário da Teoria da Relatividade de Albert Einstein. Entre outras consequências esta teoria poria fim à ideia do éter, meio material necessário, semelhantemente ao som, através do qual a luz se propagava. O jargão popular “tudo é relativo” certamente não se deve a ele, pois seus postulados estão fundamentados em algo absoluto: a velocidade da luz no vácuo – 300.000 km/s. Hoje sabe-se que:

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “O Paradoxo dos Gêmeos Explicado” – YouTube. Duração 11min05s. Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=98OvQpOkOIU>>. Acesso em: 17/05/2022.

- VÍDEO 2 – “Raios Cósmicos, múon, Dilatação do Tempo e Contração do Espaço” – YouTube. Duração 9min53s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=QnLxDDyI EsM>>. Acesso em 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “A vida do múon” – Disponível em: <<https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/2Relatividade>

I. O som propaga-se no vácuo.

II. A luz propaga-se no vácuo.

III. A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite do universo.

É (são) verdadeira(s):

- A) todas
- B) nenhuma
- C) somente II
- D) II e III
- E) somente III

3 - (UFRGS) De acordo com a Teoria da Relatividade quando objetos se movem através do espaço-tempo com velocidades da ordem da velocidade da luz, as medidas de espaço e tempo sofrem alterações. A expressão da contração espacial é dada por $L = L_0(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, onde v é a velocidade relativa entre o objeto observado e o observador, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, L é o comprimento medido para o objeto em movimento, e L_0 é o comprimento medido para o objeto em repouso.

A distância Sol-Terra para um observador fixo na Terra é $L_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. Para um nêutron com velocidade $v = 0,6 c$, essa distância é

- A) $1,2 \cdot 10^{10}$ m
- B) $7,5 \cdot 10^{10}$ m
- C) $1,0 \cdot 10^{11}$ m
- D) $1,2 \cdot 10^{11}$ m
- E) $1,5 \cdot 10^{11}$ m

4 - (UFPE) – Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $0,8c$, em que c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

Especial/2Avidadomuon/Avidadomuon.html>. Acesso em: 12/06/2022.

- TEXTO 2 – “Medida da vida média do múon” – Disponível em:

<<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/wp-content/uploads/2018/04/Medida-da-vida-m%C3%A9dia-do-m%C3%BAon.pdf>>. Acesso em: 21/07/2022.

- TEXTO 3 – “Partículas elementares” – Disponível em:

<<https://felipe9aes.wixsite.com/particulas/inicio>>. Acesso em: 21/07/2022.



O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA



Para entendermos a curvatura da luz próximo do Sol, vamos antes falar sobre a teoria da relatividade geral.

Não é tudo a mesma coisa?

Claro que não!

A física clássica descreve o movimento de um corpo conhecendo as forças que atuam sobre ele.

A gravidade é uma força, não é?

Para a física clássica sim.

Aí que entra o Einstein. Ele defendia que a gravidade não era uma força entre duas massas a certa distância, como previa a teoria clássica.

Mas qualquer objeto "cai" porque está sofrendo a ação da força da gravidade e fica acelerado.

Sim. E aí está a grande questão de Einstein: como relacionar a gravidade ao movimento com aceleração, sem falar de força.

Vamos usar a imaginação: caso o Ben esteja em uma nave espacial sem visão para fora da nave e bem afastada do planeta, sem a influência da gravidade.

Sempre eu!!!

Você estaria flutuando dentro da nave.

Se a nave começar a se mover cada vez mais rápida, ou seja, acelerada, o Ben sentirá uma força nas patinhas, chamada força inercial, semelhante a ação gravidade.

Parece legal.

ACELERAÇÃO $9,8 \frac{m}{s^2}$

FORÇA INERCIAL

Inclusive, se o Ben "deixar cair" algo, será semelhante ao que observa próximo da Terra.

Quer dizer que o efeito da aceleração é igual ao da gravidade e vice e versa?

Exatamente!!! E este é o princípio da equivalência.

PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA¹⁹

Se um observador está em pé sobre uma balança dentro de um elevador fechado, ao perceber que o ponteiro da balança começa a indicar um valor diferente para sua massa, duas explicações são possíveis.

- 1 – o elevador está em movimento com velocidade variável em módulo, ou
- 2 – o campo gravitacional local mudou.

Algo semelhante é sugerido no primeiro quadrinho da última tirinha da HQ.

Se o cabo do elevador arrebentou e ele entra em queda livre, a balança vai indicar zero, situação que chamamos de imponderabilidade²⁰. O observador e todos os objetos dentro do elevador parecem flutuar. Na HQ da sexta aula tal situação é ilustrada de forma semelhante no segundo quadrinho da terceira tirinha. Esse efeito de flutuação sugere gravidade zero, mas na verdade pode ser conseguido de duas formas:

- 1 – pela anulação do campo gravitacional, ou
- 2 – por um movimento do elevador com aceleração igual à gravidade em módulo.

De dentro do elevador, sem observar o que acontece lá fora, não há como saber o que de fato está acontecendo. A impossibilidade de decidir entre as duas explicações aceitáveis acima constitui basicamente o princípio da equivalência, que diz: Se um observador está dentro de um recinto fechado, sem ter como olhar para fora, não há como saber se o recinto está sob a ação de um campo gravitacional uniforme ou se está acelerado. Ou seja, a imponderabilidade.

A dupla possibilidade entre a ação de um campo gravitacional ou de uma aceleração é denominado princípio da equivalência.

Vídeo

Como forma de complementar os conhecimentos expostos até o momento, assistir o vídeo indicado, seguido de momento de reflexão.

VÍDEO: *A relatividade geral explicada*.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jYlr3G9yB8s>>.

Duração: 10min47s.

Atividades de fechamento da aula

A atividade da aula será desenvolvida pelos próprios alunos, organizados em pequenos grupos com 3 ou 4 alunos. Cada grupo desenvolve um caça palavras ou uma cruzadinha, abordando o entendimento referente os tópicos sobre relatividade estudados até agora.

Um grupo apresenta sua atividade para que o outro possa resolver. Ao término da atividade, os grupos trocam entre si opiniões sobre o que foi desenvolvido pelo outro grupo. Avaliação entre os pares, no caso entre os grupos.

Materiais complementares

- VIDEO 1 – “*RG05 - Princípio de equivalência*” – YouTube – Duração: 20min44s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kSG4MqrWpFI>>. Acesso em: 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “*Teoria da relatividade geral*” – Disponível em <<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/teoria-relatividade-geral.htm>>. Acesso em 23/07/2022.

- TEXTO 2 – “*Princípio da equivalência*” – Disponível em <[---

¹⁹ Texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.](https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node4PE.html#:~:text=na%20forma%20seguinte%3A-,Princ%3ADpio%20da%20Equival%3AAncia%20%5BEinstein%5D%20...,duas%20situa%C3%A7%C3%B5es%20por%20qualquer%20experi%C3%Ancia%22%20.>”. Acesso em 11/07/2022.</p></div><div data-bbox=)

²⁰ Imponderabilidade é o estado em que não se pode discernir se está sob a ação de um campo gravitacional ou em queda livre. Também é descrita como a sensação de ausência de compressão de apoio, resultante da ausência de força normal. (Wikipedia).



Aula 7

A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

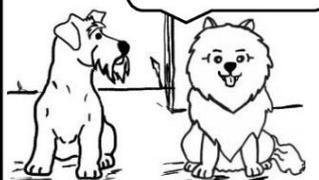
Dentro da nave, sem ter visão de fora, não é possível definir se a nave está sobre a ação da gravidade ou acelerada.



Isso mesmo. Por isso o nome "princípio da equivalência".

Agora podemos falar sobre a curvatura da luz.

Opa! O "bicho vai pegar"!



Pensa comigo Ben: se uma pessoa está num elevador em queda livre com uma lanterna na mão. Como ela vê a trajetória da luz?



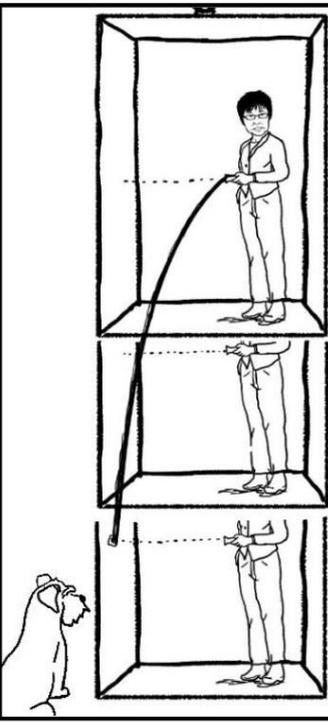
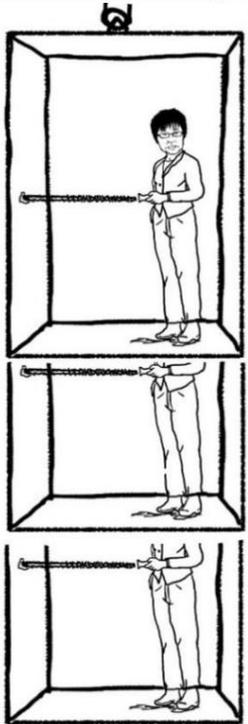
Ué, em linha reta! Batendo o tempo todo no mesmo lugar.



Exatamente. A pessoa e a lanterna estão no mesmo referencial.



E se o observador estivesse em um referencial externo ao elevador?



Ué! Neste caso, como o elevador está em queda acelerado e a luz bate o tempo todo no mesmo ponto do elevador. Quem está fora iria observar a luz numa trajetória curva.



Não estou entendendo nada!



Pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito seria possível pela ação do campo gravitacional.



Deixar-me ver se acerto: Einstein concluiu que a gravidade poderia curvar a trajetória da luz!?

Isso mesmo!



Mas como seria possível curvar a trajetória da luz?



Einstein propôs que uma massa muito grande, causa deformação no espaço-tempo, da mesma forma que uma bola "pesada" deforma a superfície e um lençol esticado.



Na verdade, a luz estaria apenas acompanhando o espaço-tempo deformado.



Foi isto que os cientistas observaram no eclipse de Sobral!

Exatamente



FIM

CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO²¹

O princípio da equivalência torna-se contundente quando aplicado à luz. Imagine, por exemplo, um observador segurando uma lanterna dentro de um elevador. Supondo-se que o elevador despenque em queda livre e num certo momento da queda a lanterna é ligada. O Observador (O_2) dentro do elevador, cai com a lanterna e vê um raio de luz que segue em linha reta, cruza o elevador e bate na parede da frente, conforme ilustrado na parte central da HQ dessa aula, na figura a esquerda. Até aí, nada de mais.

Mas se outro observador externo (O_1), parado em relação ao chão, pudesse enxergar através das paredes do elevador, o que veria? Na figura central da HQ à direita, temos a visão desse observador.

Nota-se que para O_1 o raio de luz literalmente encurva! Neste caso, sabemos que a causa dessa curvatura é o movimento acelerado do elevador. Mas, pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito poderia ser conseguido a partir de um campo gravitacional externo. Einstein concluiu, a partir desse raciocínio, que a gravidade deveria forçar a luz a fazer curva!

É a partir daí que surge a interpretação geométrica para os efeitos da gravidade. Podemos considerar que corpos com grande massa provocam uma curvatura no espaço-tempo ao seu redor. Dessa forma, mesmo a luz, caminhando supostamente em uma linha reta, deveria acompanhar a curvatura do espaço-tempo, como que sofrendo a ação atrativa da gravidade.

Segundo Einstein, corpos com grande massa, como estrelas, por exemplo, poderiam tirar a luz de sua suposta e previsível trajetória retilínea.

Mais uma vez surge a importante pergunta: como testar a teoria? Como vamos conseguir um corpo de massa estelar aqui na Terra? Impossível!

Novamente entra em cena a criatividade dos cientistas. Uma oportunidade importante para testar a teoria é um eclipse solar total. A ideia é fotografar as estrelas visualmente próximas ao Sol e que só aparecem quando o disco solar é encoberto pela Lua, no curto período em que o dia vira noite, na totalidade do eclipse. Numa outra época do ano, quando essa mesma constelação estiver visível à noite, sem a presença do Sol, uma segunda exposição fotográfica pode ser feita.

Nessa segunda foto, as posições das estrelas devem ser ligeiramente diferentes daquelas obtidas durante o eclipse, pois desta vez, sem o Sol, a luz chega até a máquina fotográfica em linha reta. Se conseguirmos medir essas mínimas diferenças nas posições das estrelas, então fica provado que na presença do Sol desvia, de fato, a luz! Genial, não?

Vídeo

Sugere-se assistir o vídeo 1, cujo *link* está disponível nos materiais complementares.

Atividades finais da aula

Os alunos responderão o questionário avaliativo final do Produto Educacional.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “*Como a gravidade deforma o tempo? Relatividade Geral*” – YouTube – Duração: 17min37s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=56TJuxnWC-c&t=3s>>. Acesso em: 23/05/2022.

- TEXTO 1 – “Porque espaços-tempo curvos? Gravidade como curvatura do espaço-tempo”. Disponível em: <<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node8EspCurvos.html>>. Acesso em: 23/07/2022

²¹ Continuação do texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

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

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Tradução: Silvio Levy. Título original: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (1916). Porto Alegre: L&PM, 2019.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Ótica e Física Moderna**. v. 4, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A origem histórica da relatividade especial**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

MENEZES, Luis Carlos de. **A matéria uma aventura do espírito**: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005).

NASCIMENTO, Nicolas. L. N. S.; CUZINATTO, Rodrigo. R.. Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20220004, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0004>>. Acesso em 16/04/2023.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4**: ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

PEREIRA, Ricardo Vieira. **Múon relativístico**. Produto educacional do programa de Mestrado Nacional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF) do polo da Universidade Federal do ABC (UFABC), 2019. Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 12/06/2022.

PIATTELLA, Oliver. F. Introdução à relatividade geral. **Cadernos de Astronomia**, Vitória, v. 1, n. 1, p. 30–39, 2020. DOI: 10.47083/Cad.Astro.v1n1.30827. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrologia/article/view/30827>. Acesso em: 2 maio de 2023.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.