



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

AMILCAR COSTA

**ONDAS GRAVITACIONAIS NO ENSINO MÉDIO**

---

Londrina  
2021

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



AMILCAR COSTA

## ONDAS GRAVITACIONAIS NO ENSINO MÉDIO

---

Londrina  
2021

AMILCAR COSTA

## **ONDAS GRAVITACIONAIS NO ENSINO MÉDIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Londrina no curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF) como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Física.

Orientação: Prof. Dr. Manuel Simões.

Londrina  
2021

C837 Costa, Amilcar.  
Ondas gravitacionais no ensino médio / Amilcar Costa. - Londrina, 2021.  
111 f. : il.

Orientador: Manuel Simões.  
Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2021.  
Inclui bibliografia.

1. Ensino de Física - Tese. 2. Sequência Didática - Tese. 3. Ondas Gravitacionais - Tese. I. Simões, Manuel . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Título.

CDU 53

AMILCAR COSTA

## **ONDAS GRAVITACIONAIS NO ENSINO MÉDIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Londrina no curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF) como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Física.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Manuel Simões  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Nelson Studart  
Universidade Federal do ABC - UFABC

---

Prof. Dr. Alexandre Urbano  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 27 de abril de 2021.

*A Deus, por estar sempre presente  
ao meu lado, guiando e iluminando  
cada passo, dando a força e a fé  
necessárias para enfrentar os  
obstáculos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Nestes anos de mestrado, de muito estudo, duas universidades, gostaria de agradecer a algumas pessoas que me acompanharam e foram fundamentais para a complementação de mais uma etapa. Aqui expresso, através de palavras, um pouco da importância que elas tiveram, e ainda tem, nesta conquista.

Primeiramente agradeço a meus pais Deolindo e Ana Rosa pela educação que me proporcionaram com amor e dedicação sempre tentando fazer o melhor que podiam e estava ao alcance deles. Às minhas irmãs, Atila, por ter incentivado a iniciar o curso de mestrado e Aglaé pelo apoio para não desistir. À minha esposa, Vivianne, pelo apoio e motivação nos momentos difíceis. A vocês, minha família, obrigado por tudo que sou, pelo que consegui conquistar e pela felicidade que tenho e por desejarem o melhor para mim.

Aos meus orientadores, Nelson Studart, Cesar Lenzi, Manuel Simões, minha gratidão especial pelo apoio, dedicação e pelo tempo dedicado em me orientar.

Aos meus amigos de turma, principalmente João, Robson, Sebastião, Thiago, Willie e Hécio pelos momentos de estudos, compartilhando experiências. Obrigado pela amizade e companheirismo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

COSTA, Amilcar. **Ondas gravitacionais no ensino médio**. 2021. 111 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

## RESUMO

Após mais de cem anos da Teoria Geral da Relatividade ser anunciada, foi comprovada uma parte importante da teoria de Einstein, a existência das ondas gravitacionais. A certeza de que elas de fato existem, abriu uma nova janela para a exploração do Cosmos, permitindo ampliar os conhecimentos sobre estrelas, galáxias e buracos negros distantes, com base nas ondas por eles produzidas. No ensino médio, pouco se fala sobre física moderna, apesar de ser um assunto que fascina os alunos. Para abordar esse assunto, apresentamos uma estratégia para ensinar Ondas Gravitacionais como um novo tipo de ondas, fazendo analogias com as já conhecidas ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas. O resultado principal deste trabalho foi um produto educacional destinado a professores de Ensino médio (mas não se restringe apenas a este nível de ensino) que tenham a intenção de inovar na sala de aula. O conhecimento a ser transmitido não se destina à formação de cientista, mas uma forma de chegar a ser compreendida e despertar interesse para um conhecimento mais aprofundado. A sequência didática foi constituída por seis aulas repletas de metodologias ativas. Em algumas turmas foi possível uma interação mínima do professor. A sequência didática se inicia com a identificação dos conceitos prévios dos alunos e assim constatar as condições necessárias para garantir a aprendizagem, adequando o material à realidade da turma. Segue-se com atividades que vão desde a apresentação de um filme, uma aula expositiva e diversos simuladores experimentais. Após a aplicação do produto educacional, observamos uma aprendizagem realmente significativa no conhecimento e aumento do interesse dos alunos nas aulas, superando os resultados esperados.

**Palavras-chave:** ensino de física; sequência didática; ondas gravitacionais; buraco negro; teoria da relatividade geral.

COSTA, Amilcar. **Ondas gravitacionais no ensino médio**. 2021. 111 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

## **ABSTRACT**

It has been more than a century since the General Theory of Relativity was published, for the first time, an essential part of Einstein's theory, the existence of gravitational waves, has been proven. The certainty that they do exist presented an opportunity for the exploration of the Cosmos, allowing to expand knowledge about stars, galaxies, and distant wormholes, based on the waves produced by them. In high school, little is taught about modern physics, despite being a subject that fascinates students. To address this issue, we present a strategy to teach Gravitational Waves as a new type of waves, making comparisons with the mechanical and electromagnetic waves, which are already known by the students. The main result of this research was an educational product aimed at high school teachers. It is not restricted to teachers working in this stage of education, but also any teacher who intends to innovate in the classroom. The knowledge to be transmitted is not intended to produce scientists, but a way to make this science understood and ignite students' interest for deeper knowledge. The didactic sequence consisted of six classes full of active learning methodologies. In some classes, minimal teacher interaction was possible. The didactic sequence begins with the identification of the students' previous concepts and thus confirms the necessary conditions to guarantee their learning, adapting the material to the reality of the class. It continues with activities since from the presentation of a film, an expository class and several experimental simulators. After the performance of the educational product, we observed a significant boost in learning and students became more engaged during classes, exceeding the expected results.

**Keywords:** physics teaching; following teaching; gravitational waves; black hole; theory of general relativity.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>TEORIAS DE APRENDIZAGEM</b> .....	<b>13</b>
2.1	APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA.....	13
2.2	SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	14
2.3	TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA.....	15
2.4	MAPAS CONCEITUAIS .....	17
<b>3</b>	<b>GRAVITAÇÃO</b> .....	<b>19</b>
3.1	QUAL A IMPORTÂNCIA EM DETECTAR AS ONDAS GRAVITACIONAIS? .....	19
3.2	ABORDAGEM HISTÓRICA.....	19
3.3	A RELATIVIDADE .....	26
3.3.1	Relatividade Newtoniana.....	28
3.3.2	Teoria Da Relatividade Restrita.....	30
3.3.2.1	Experiência de Michelson.....	31
3.3.2.2	Postulados da relatividade .....	33
3.3.2.3	Dilatação do tempo.....	34
3.3.2.4	Contração do espaço .....	38
3.3.3	Relatividade Geral.....	39
3.3.3.1	A proposta para explicar os efeitos gravitacionais.....	40
3.3.3.2	A curvatura espaço-tempo .....	44
3.4	ONDAS GRAVITACIONAIS .....	49
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>52</b>
4.1	PESQUISA .....	52
4.2	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	53
4.3	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS.....	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>56</b>
5.1	ANÁLISE DOS MAPAS CONCEITUAIS E AVALIAÇÃO .....	56
5.2	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA .....	68

<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIA .....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Quando se fala em física, muitos exaltam os grandes físicos por suas inteligências, talentos e grandes descobertas. Newton, sempre lembrado por suas leis, da dinâmica e da Gravitação Universal, enquanto Albert Einstein é lembrado pela Teoria da Relatividade.

Em 2016, após cento e um anos da Teoria Geral da Relatividade ser anunciada por Einstein, ela foi, mais uma vez, confirmada com a detecção das ondas gravitacionais. Uma das maiores descobertas das últimas décadas, esta descoberta abre mais uma janela para se observar o universo. A detecção das ondas gravitacionais permite “ver” o universo através de “telescópios que percebem a gravidade”. Assim, pode-se entender mais sobre o universo, medir as massas dos buracos negros e saber mais sobre como são formados. Agora pode-se ver o universo e até “ouvi-lo”. A onda gravitacional não é audível (não é onda sonora) mas como sua vibração está na ordem de frequência audível, é possível criar uma onda sonora com a frequência da onda gravitacional recebida. Assim é possível “ouvir” a onda gravitacional.

Mas para entender como as ondas gravitacionais são geradas, transmitidas e detectadas, é necessário ter conhecimento do conceito de onda, quais os tipos de ondas, como podem ser geradas e transmitidas, quais fenômenos ocorrem com as ondas entre outros pontos importantes de seu estudo.

Há mais de vinte anos a Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB, Art. 35), ao abordar as finalidades do ensino médio, diz que:

- I – a consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no ensino fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos;
- II – a preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando, para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores;
- III – o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico;
- IV – a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.

Pode-se observar preocupação com que o aluno retenha de forma eficaz seu aprendizado. A resolução do Conselho Nacional de Educação (CNE) e da Câmara de Educação Básica (CEB) diz que é necessário procura-se aplicar metodologia que

favoreça e “estimule o protagonismo dos alunos, possibilitando o aproveitamento de estudos e o reconhecimento de saberes adquiridos nas experiências pessoais, sociais e do trabalho”.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que é um documento de caráter normativo e define o conjunto orgânico e progressivo de aprendizagens essenciais que todos os alunos devem desenvolver ao longo das etapas e modalidades da Educação Básica, complementa os currículos para assegurar as aprendizagens essenciais da Educação Básica. Em seu texto, a BNCC espera um conjunto de ações tais como:

- contextualizar os conteúdos dos componentes curriculares, identificando estratégias para apresentá-los, representá-los, exemplificá-los, conectá-los e torná-los significativos, com base na realidade do lugar e do tempo nos quais as aprendizagens estão situadas;
- decidir sobre formas de organização interdisciplinar dos componentes curriculares e fortalecer a competência pedagógica das equipes escolares para adotar estratégias mais dinâmicas, interativas e colaborativas em relação à gestão do ensino e da aprendizagem; selecionar e aplicar metodologias e estratégias didático-pedagógicas diversificadas, recorrendo a ritmos diferenciados e a conteúdos complementares, se necessário, para trabalhar com as necessidades de diferentes grupos de alunos, suas famílias e cultura de origem, suas comunidades, seus grupos de socialização etc.;
- conceber e pôr em prática situações e procedimentos para motivar e engajar os alunos nas aprendizagens;
- construir e aplicar procedimentos de avaliação formativa de processo ou de resultado que levem em conta os contextos e as condições de aprendizagem, tomando tais registros como referência para melhorar o desempenho da escola, dos professores e dos alunos;
- selecionar, produzir, aplicar e avaliar recursos didáticos e tecnológicos para apoiar o processo de ensinar e aprender;
- criar e disponibilizar materiais de orientação para os professores, bem como manter processos permanentes de formação docente que possibilitem contínuo aperfeiçoamento dos processos de ensino e aprendizagem. (BASE NACIONAL COMUM CURRICULAR, pág. 16)

Assim, a sequência didática apresentada tem como objetivo ensinar de forma significativa Ondas Gravitacionais no ensino médio. É importante que o aluno compreenda que as Ondas Gravitacionais são um novo tipo de ondas. Primeiro vamos aplicar alguns questionamentos para verificar o conhecimento dos alunos sobre ondas. Para isso pediremos que eles façam um mapa mental sobre ondas. Como o objetivo de despertar interesse para um conhecimento mais aprofundado, vamos apresentar um texto sobre a comprovação da existência das ondas gravitacionais. O próximo passo é compreender o conceito de ondas. Através de simuladores do Phet, os alunos devem colocar em prática situações e procedimentos de forma a interpretar a formação de ondas, a relação entre comprimento de onda e frequência, a relação

entre a intensidade da onda com a amplitude. Faremos atividades com ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas para que atinjam a diferença entre estas ondas em sua formação e propagação. Estas atividades motivam os alunos a se engajar na aprendizagem além de serem estratégias mais dinâmicas, interativas e colaborativas. Na sequência poderemos introduzir as Ondas Gravitacionais. Num experimento com lençol e esferas de tamanhos e massas diferentes, os alunos podem compreender a gravidade pela deformação espaço-tempo, e observar que as ondas devem transmitir energia por meio de deformações e reconhecer causas da variação de movimentos associadas à deformação no espaço-tempo. Na próxima etapa, o objetivo é definir como detectar as OG. Através do conhecimento do interferômetro, através de aplicativo, o aluno deve compreender o funcionamento do Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser (LIGO). Após estas atividades faremos a avaliação para analisar se nossos objetivos foram atingidos.

## 2 TEORIAS DE APRENDIZAGEM

Neste capítulo, falamos sobre a Teoria de Aprendizagem Significativa proposta por David Paul Ausubel onde a aprendizagem deve ser muito mais do que uma simples execução de comandos. Assim, pode-se fazer com que a construção do conhecimento seja por meio de atividades que preveem a capacidade de construir argumentos, conclusões ou opiniões. Na sequência, será abordada a importância da organização e planejamento cuidadosos para o sucesso das ações, apresentando os conceitos de Sequência Didática, Transposição Didática e os Mapas Conceituais.

### 2.1 Aprendizagem Significativa

Para Ausubel, o processo de aprendizagem será significativo se fizer algum sentido para o aluno. O ensino parte do conhecimento prévio<sup>1</sup> do aluno, chamado de subsunçor<sup>2</sup>.

Para Moreira e Masini (1982, p.7),

a aprendizagem significativa só ocorre quando um novo assunto, que possui uma estrutura lógica, interage com conceitos relevantes e inclusivos, claros e disponíveis na estrutura de conhecimento do indivíduo. Desta forma: A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação se ancora em conceitos relevantes preexistentes na estrutura cognitiva de quem aprende.

Então, a aprendizagem significativa ocorre quando o novo conhecimento se ancora em conceitos subsunçores já existentes na estrutura cognitiva do indivíduo. Esta ancoragem segue uma “hierarquia de conceitos” onde os conceitos específicos vão se ligando a conceitos gerais. Assim, espera-se que com a aprendizagem significativa ocorra um crescimento e modificação do conceito subsunçor. O conhecimento é construído de modo que os novos conceitos vão se ligando e facilitando a compreensão das novas ideias.

Para ocorrer esta aprendizagem significativa, Ausubel observa três fatores essenciais: 1) o aluno tenha os subsunçores adequados; 2) o aluno deve estar predisposto a aprender; 3) o material deve ser potencialmente significativo.

---

<sup>1</sup> Conhecimento prévio é o que o indivíduo já conhece sobre determinado assunto.

<sup>2</sup> O subsunçor será um ponto de ancoragem para as novas ideias e informações que são aprendidas.

No primeiro fator, as novas informações devem fazer sentido ao aluno. Para isso devem ser ancoradas em subsunçores que ele possui e que possibilite, de alguma forma, uma relação com o que está aprendendo.

No segundo fator, Ausubel considera necessário que o aluno se coloque como sujeito ativo e não passivo em seu processo de aprendizagem. O aluno precisa ter a intenção de aprender, precisa decidir relacionar o conteúdo ensinado aos elementos do seu sistema cognitivo. Isso não significa que ele tenha que gostar da matéria estudada, apesar de ser um fator que pode favorecer a construção de conhecimento.

Moreira (1999, p. 23) afirma que diz que a aprendizagem significativa é uma decisão do sujeito.

[...] Esta condição implica o fato de que, independentemente de quão potencialmente significativo possa ser o material a ser aprendido, se a intenção do aprendiz for, simplesmente, a de memorizá-lo arbitrariamente e literalmente, tanto o processo de aprendizagem como seu produto serão mecânicos (ou automáticos) (MOREIRA, 1999b, p. 23)".

“o material potencialmente significativo é aquele que é relacionável ou incorporável à estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não-arbitrariamente e não-literal.

Dentro desse contexto, o material desenvolvido neste estudo deseja induzir a aprendizagem significativa por parte dos alunos. Partindo de uma avaliação prévia dos conhecimentos sobre o assunto, o planejamento da sequência de atividades levará a um material potencialmente significativo, promovendo a aprendizagem significativa, pois facilitará as relações entre os novos conceitos com os subsunçores. A proposta deste produto é deixar o aluno no centro do processo de ensino, com atividades colaborativas e individuais, fazendo com que eles apresentem de forma explícita o entendimento deles.

## **2.2 Sequência Didática**

Sempre que desejamos executar algo em nossas vidas, devemos nos organizar para atingir nossos objetivos, quer seja para uma viagem, para uma reforma em nossa casa e também para o ensino. O planejamento deve ser cuidadoso para o sucesso das ações seguintes.

Enquanto educadores e professores desejamos um processo educacional que funcione, que seja eficaz. Desta forma procura-se montar estratégias no qual os objetivos sejam alcançados. Entre algumas estratégias podemos destacar a sequência didática (SD).

Pode-se dizer que a SD é uma sucessão planejada de atividades progressivas e articuladas entre si, planejadas para ensinar um conteúdo, etapa por etapa, desde a motivação até a avaliação. Deve-se organizar as etapas de acordo com os objetivos que o professor deseja alcançar, envolvendo desde as atividades de aprendizagem até as de avaliação.

Uma SD deve iniciar com uma avaliação prévia do conhecimento dos alunos para que o professor, baseando-se nesses conhecimentos, organize o trabalho na sala de aula de forma gradual, partindo do nível de conhecimento que os alunos já dominam para chegar aos níveis que eles precisam dominar.

Para que uma SD contribua de forma a aumentar a eficiência na prática pedagógica, ela deve ser muito bem pensada para que cada momento da aula seja uma sequência de atividades com começo, meio e fim, orientando o professor e o aluno em seu caminho de aprendizagem.

Uma proposta de SD é a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS). Para Moreira, uma UEPS deve ter uma proposta de ensino e seu objetivo, assim definidos deve-se seguir alguns passos:

- Situação inicial: Deve ser um dos primeiros momentos com o aluno. Deseja-se que o aluno externize seu conhecimento prévio que provavelmente será relevante na aprendizagem do que será trabalhado;
- Situações-problema: Propor situações-problema, em nível bem introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno, que preparem o terreno para a introdução do conhecimento que se pretende ensinar;
- Diferenciação progressiva e reconciliação integradora: Deve-se fornecer novos significados para o conceito observado no conhecimento prévio, deixando o conceito mais diferenciado. Para isso serão necessárias muitas reconciliações entre as diferenças reais e aparentes integrando novos significados.
- Aprofundamento dos conhecimentos: Apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, começando com aspectos mais gerais, inclusivos, dando uma visão inicial do todo, do que é mais importante na unidade de ensino;
- Nível mais alto de complexidade: Retomar os aspectos que efetivamente se pretende ensinar, em nova apresentação (que pode ser através de outra breve exposição oral, de um recurso computacional, de um texto, etc.), porém em nível mais alto de complexidade em relação à primeira apresentação;
- Concluindo a unidade: Retomar as características mais relevantes do conteúdo, feito através de nova apresentação dos significados que pode ser, outra vez, uma breve exposição oral, a leitura de um texto, o uso de um recurso

computacional, etc.; novas situações-problema devem ser propostas e trabalhadas em níveis mais altos de complexidade em relação às situações anteriores;

- Avaliação da aprendizagem: Deve ser feita ao longo de sua implementação, registrando tudo que possa ser considerado evidência de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado; além disso, deve haver uma avaliação somativa individual;

- A UEPS somente será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativa. A aprendizagem significativa é progressiva, o domínio de um campo conceitual é progressivo; por isso, a ênfase em evidências, não em comportamentos finais.

### 2.3 Transposição Didática

Ao se falar em ondas gravitacionais (OG), depara-se com conhecimentos novos aliados a conhecimentos já bem conhecidos sobre as ondas. Porém, é importante ter o domínio de algumas leis e teorias que não são muito trabalhadas no ensino médio dificultando a compreensão dos alunos. Assim, ao ensinar os conhecimentos científicos, o professor poderá fazer algumas adaptações para que o conhecimento científico fique claro. Porém, para que o trabalho didático seja eficaz na sala de aula não se pode simplificar o conhecimento científico de forma que ao ser ensinado não tenha significado algum para os alunos.

O francês Yves Chevallard, conhecido por suas contribuições, na década de 1980, à teoria da transposição didática, que permite estudar as relações entre as diferentes formas de conhecimento, conhecimento de referência, conhecimento para ensinar, conhecimento ensinado e o conhecimento aprendido, diz que:

“Um conteúdo de saber que tenha sido definido como saber a ensinar, sofre, a partir de então, um conjunto de transformações adaptativas que irão torná-lo apto a ocupar um lugar entre os objetos de ensino. O ‘trabalho’ que faz de um objeto de saber a ensinar, um objeto de ensino, é chamado de transposição didática.” (CHEVALLARD)

Assim, ao observar a onda gravitacional detectada, ela pode, e deve entrar no contexto de aula e sua explicação alinhada com o estudo das ondas mecânicas e eletromagnéticas, fazendo comparações e chegando a verificar que se tem uma nova onda e uma nova forma de “observar” o universo. Mas, para que este conhecimento chegue de forma eficaz, deve-se executar uma transposição didática sem deixá-la simplista e perder os conceitos envolvidos. Necessário também trazer à luz maior

conhecimento da física moderna, principalmente a Teoria da Relatividade Geral. Pode-se, sim, limitar a profundidade conceitual e as linguagens empregadas em algumas situações de acordo com a maturidade dos alunos e a melhor compreensão, pois neste caso, o conhecimento a ser transmitido não se destina à formação de cientista, mas uma forma de chegar a ser compreendida e despertar interesse para um conhecimento mais aprofundado.

Desta forma, o “saber sábio” dos cientistas deve ser muito bem pensado para a transposição didática a ser seguida, vindo a produzir o “saber a ensinar”. Com o material produzido, o professor, ao executar a sequência didática (SD), terá nova transposição didática chegando ao “saber ensinado”.

## **2.4 Mapas Conceituais**

No planejamento da sequência didática é importante ser cuidadoso no processo educacional para que ele seja eficaz. As estratégias ajudarão a chegar aos objetivos. Para Lemos (2005, p. 41), “[...] o aluno, com sua identidade particular, é o ponto de partida para a organização do ensino que, por sua vez, só terá sido bem sucedido se o aluno, agora como ponto de chegada, tiver aprendido significativamente”.

Nas aulas de física, as práticas investigativas e argumentativas são essenciais. E como diz Lemos, “o conhecimento prévio do estudante é importante para o entendimento de novos conceitos”. Para David Ausubel o conhecimento que o aluno já possui é um fator de grande influência em sua aprendizagem. Assim, para se obter um aprendizado significativo, é importante que o professor verifique quais são os conhecimentos que o aluno possui a respeito de um determinado assunto e se são corretos e suficientes para que o novo assunto seja compreendido.

Para o professor acessar e avaliar o que o estudante sabe, pode-se utilizar de várias estratégias como, por exemplo, criar uma lista ou tabela, um teste diagnóstico, um esquema, um mapa.

Joseph Novak<sup>3</sup>, em sua teoria de Educação, propõe como estratégia para aprendizagem significativa, o mapeamento conceitual, fundamentado nas ideias de Ausubel.

---

<sup>3</sup> Joseph Donald Novak é um empresário e educador americano. É conhecido mundialmente pelo desenvolvimento da teoria do mapa conceitual na década de 1970.

Os mapas conceituais são estruturas gráficas semelhantes a diagramas, capazes de apresentar como o aluno estrutura e correlaciona o conjunto de conceitos aprendidos. Neles, pode-se verificar o domínio do assunto, lacunas e equívocos, e dessa forma, tanto o docente como o discente podem verificar as dificuldades e avanços alcançados.

No mapa conceitual, ficam claras as relações entre os conceitos na forma de proposições. Uma proposição é constituída de dois ou mais termos conceituais unidos por palavras para formar uma unidade semântica (NOVAK; GOWIN, 1996). Em sua construção, os conceitos devem seguir uma hierarquia, onde os mais gerais ficam na parte superior, e os conceitos mais específicos na parte inferior.

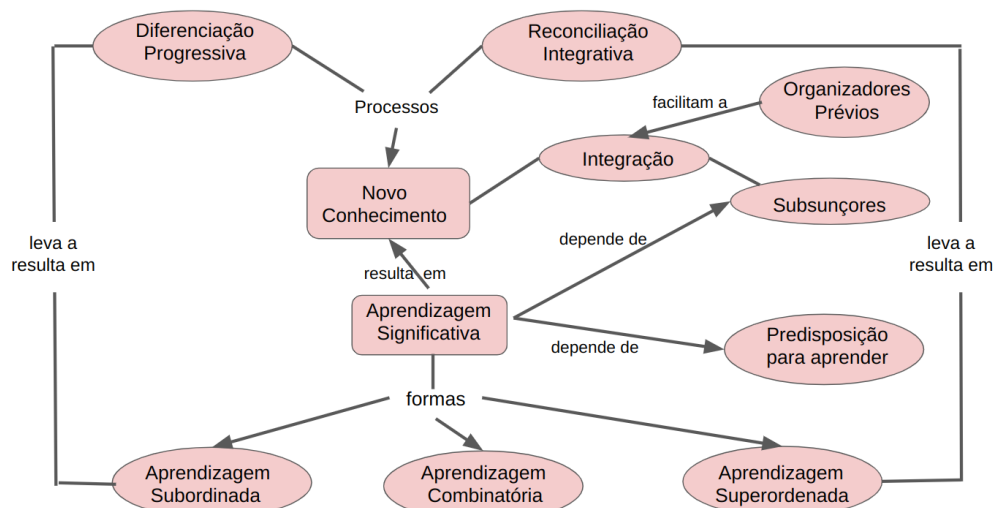
Na produção de um mapa conceitual de um determinado tema, o estudante vai observando de forma mais clara quais as suas dificuldades de entendimento deste tema, quais são os conceitos relevantes e quais as relações sobre esses conceitos. Assim ele poderá rever o assunto e tirar suas dúvidas com o professor ou através do uso de livros ou material institucional. Tavares afirma que:

Esse ir e vir entre a construção do mapa e a procura de respostas para suas dúvidas irá facilitar a construção de significados sobre conteúdo que está sendo estudado. O aluno que desenvolver essa habilidade de construir seu mapa conceitual enquanto estuda determinado assunto, está se tornando capaz de encontrar autonomamente o seu caminho no processo de aprendizagem (TAVARES).

Então, pode-se dizer que o mapa conceitual é uma boa ferramenta onde o aluno pode adquirir a capacidade de fazer com que conceitos tenham significados, sendo importante para uma aprendizagem autônoma e significativa.

Para Almeida (2008), mapas conceituais são dinâmicos, pois podem se modificar no momento que o sujeito passa a conhecer novos conceitos.

**Figura 1** - Mapa conceitual bidimensional contendo alguns dos conceitos da Teoria de David Ausubel sobre aprendizagem significativa.



**Fonte:** extraído do trabalho de (Moreira, 2012, p7.)

## **3 GRAVITAÇÃO**

### **3.1 Qual A Importância Em Detectar As Ondas Gravitacionais?**

No passado, as observações dos astrônomos foram feitas por meio da luz, inicialmente a olho nu, depois através de suas lunetas e telescópios. Com as descobertas das ondas eletromagnéticas, abriu-se uma nova janela para esta observação. Era possível também observar através das ondas de rádio e raio-x. Estas novas formas de observar trouxeram novos resultados para a astrofísica. Com ondas gravitacionais, os investigadores esperam dar um salto semelhante para a frente.

Observa-se que corpos materiais e até mesmo a luz ao se movimentar no espaço-tempo curvo são desviados de suas trajetórias, desta forma as ondas eletromagnéticas, podem apresentar informações deformadas da realidade. Já as ondas gravitacionais prometem observar regiões do nosso cosmos que são inacessíveis à observação astronômica regular e assim, espera-se expandir o campo da astronomia.

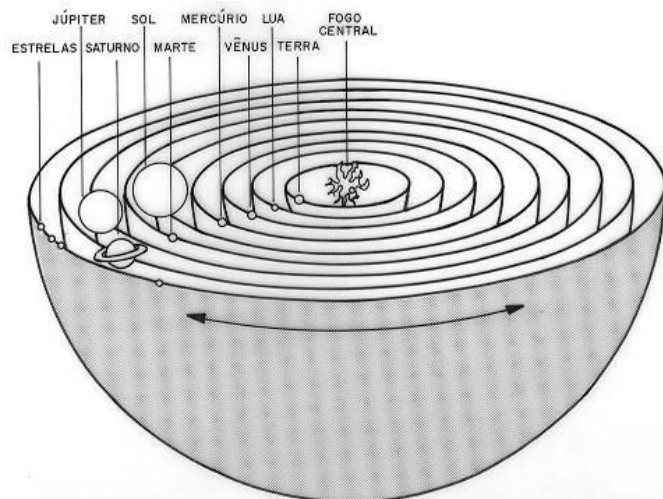
### **3.2 Abordagem Histórica**

A Astronomia é repleta de eventos que atiçam a curiosidade do homem. Desde os homens pré-históricos já havia o interesse em observar e tentar compreender o movimento do Sol e as fases da Lua. O homem observou que era possível utilizar as estrelas para orientação em viagens, marcar a passagem do tempo, prever a melhor época da colheita, etc...

Os mais antigos registros astronômicos são dos chineses, babilônios, assírios e egípcios e datam de aproximadamente 3000 a.C. Mas o ápice do estudo dos astros se deu na Grécia antiga, aproximadamente entre Grécia os anos 750 a.C. - e 146 a.C.

Por volta do século 6 a.C, a escola pitagórica desenvolveu um conceito geométrico do Universo, com esferas concêntricas onde o centro do Universo era ocupado por um fogo central. Esse fogo que fornecia energia para que os corpos se movimentassem ao seu redor. Ocupando esferas concêntricas estavam o Sol, a Lua, a Terra, alguns dos planetas e ao redor desse conjunto estaria a esfera das estrelas fixas.

**Figura 2** - No universo pitagórico, o Sol, a Lua, as estrelas e os planetas giram sobre esferas concêntricas, em torno de um fogo central. As estrelas “fixas” constituem a esfera maior.

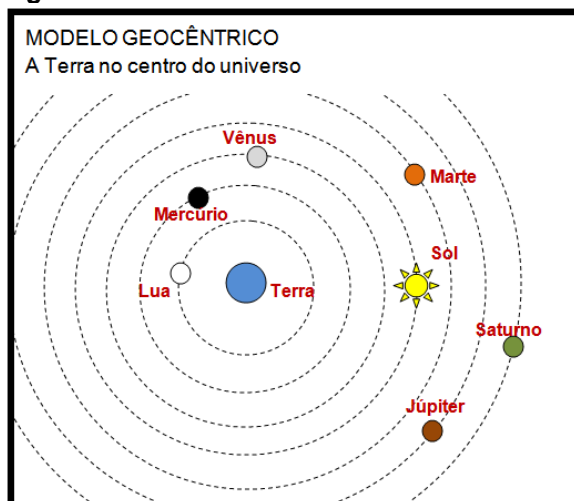


Fonte: <http://aulasdefisica.com/download/astronomia/cursoastronomia/fundamentoshistastro.htm>

Lopes diz que, para o filósofo Platão: “o universo é um todo composto de partes, grandes e pequenas, num movimento interligado devido a harmonia divina” (2014, p 5). Matsuura afirma que:

Para Platão, o fato de que o Universo era Cosmo, isto é, algo ordenado, organizado, harmonioso e belo, significava que o Universo era inteligível, podia ser captado (entendido ou apreendido) pela nossa Mente (Razão ou Intelecto) ... todos os objetos celestes eram feitos de Éter que, diferentemente dos quatro elementos, era incorruptível e seu movimento natural era circular e uniforme” (MATSUURA, 2019, p. 27 e 48).

Assim, observa-se uma grande influência dos pitagóricos sobre a cosmologia platônica. Platão propõe um sistema geocêntrico, com a Terra imóvel, mas seguindo uma perfeição no movimento dos corpos celestes: circular e uniforme. Para LOPES (2011, p.60):” O universo era concebido como um cosmos, isto é, como um sistema harmonioso, ordenado, perfeito e nesse tipo de sistema não deveriam existir irregularidades ou imperfeições”.

**Figura 3 - Modelo Geocêntrico**

**Fonte:** o próprio autor

Eudoxo, discípulo de Platão, tentou expressar matematicamente as ideias de seu mestre sobre as posições e movimento dos planetas usando várias esferas concêntricas à Terra para descrever o movimento da Lua, do Sol e dos planetas conhecidos. Toríbio e Oliveira (2019) dizem que “o modelo cosmológico de Eudoxo de Cnido (408 - 355 a.C.), o modelo das esferas concêntricas, representa o primeiro modelo matemático da cosmologia, o qual tenta explicar o movimento dos corpos celestes.”

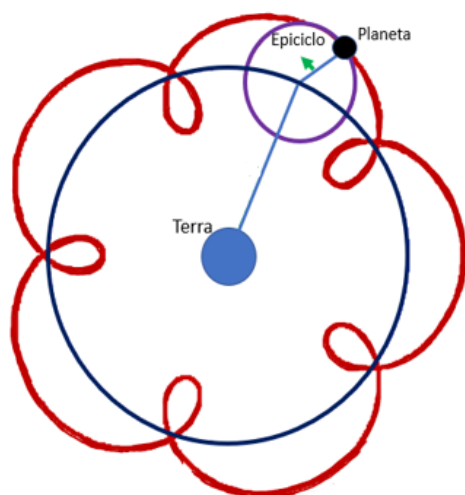
Aristóteles não aceitava o modelo pitagórico e tentou melhorar o modelo de Platão e Eudoxo. Ele defendia a ideia de que a Terra era o centro do universo e planetas e o Sol ficavam girando em torno dela. Em seu modelo, ele incorporou uma explicação física para o movimento de todos os planetas

No século II a.C., Hiparco de Nicéia propõe um novo modelo introduzindo uma combinação de círculos para explicar o movimento dos planetas: um pequeno círculo chamado epiciclo<sup>4</sup>, cujo centro se move em um círculo maior chamado deferente<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Pequeno círculo formado por um astro em torno de um ponto imaginário, que descreve, a partir de seu novo ponto, um outro círculo.

<sup>5</sup> Circunferência cujo centro descreve um movimento circular em torno da Terra.

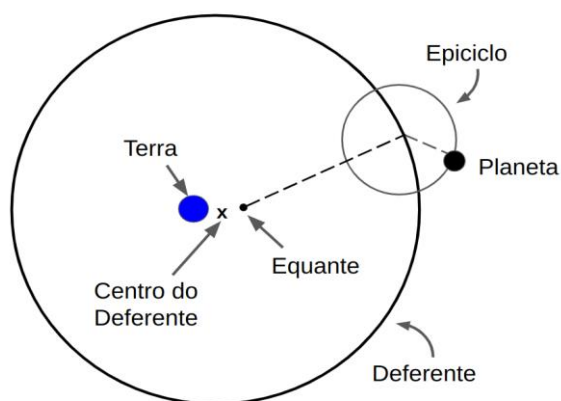
**Figura 4** - Modelo de Hiparco



**Fonte:** TIMEU: a Cosmologia de Platão, p. 89

Mais tarde, no século II d.C., o matemático e astrônomo Cláudio Ptolomeu aprimorou o trabalho de seus antecessores construindo um modelo geocêntrico mais completo e eficiente<sup>6</sup>. Para explicar o movimento não uniforme dos planetas, introduziu ainda o equante<sup>7</sup>, conseguindo prever a posição dos planetas no céu com uma precisão inédita.

**Figura 4** - Deferente, epiciclo e equante propostos por Ptolomeu.



**Fonte:** o próprio autor

Para Oliveira Filho e Saraiva (2004, p 50):

O objetivo de Ptolomeu era o de produzir um modelo que permitisse prever a posição dos planetas de forma correta e, nesse ponto, ele foi razoavelmente

<sup>6</sup> <https://sites.ifi.unicamp.br/imre/a-cosmologia-de-ptolomeu-as-bases-do-geocentrismo/>

<sup>7</sup> Ponto ao lado do centro do deferente oposto à posição da Terra, em relação ao qual o centro do epiciclo se move a uma taxa uniforme.

bem-sucedido. Por essa razão, este modelo continuou sendo usado sem mudança substancial por cerca de 1300 anos.

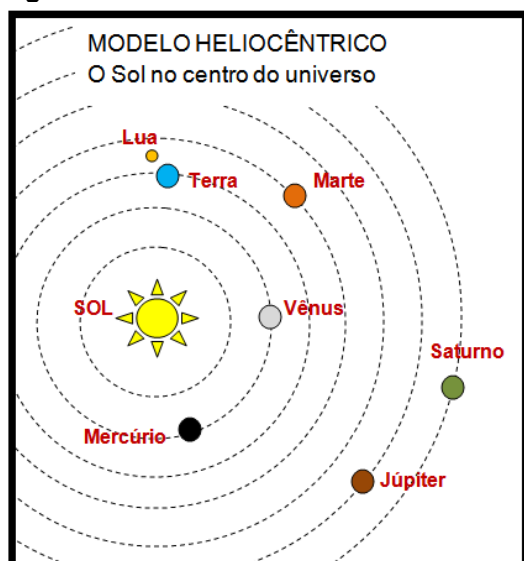
Medeiros (2015) afirma que “Aristarco é tido como tendo sido o primeiro homem a ter proposto uma Teoria heliocêntrica, dezoito séculos antes de Copérnico”, então pode-se dizer que a teoria heliocêntrica já era pensada durante o século III a.C., mas somente no século XVI d.C. Nicolau Copérnico sistematizou uma teoria para o modelo heliocêntrico.

Considerado o fundador da astronomia moderna, o polonês Nicolau Copérnico (1473 – 1543) afirmava que a Terra e os demais planetas se moviam ao redor de um ponto vizinho ao Sol, sendo, este, o verdadeiro centro do universo. Pelo temor de ser condenado por heresia pela Igreja Católica, Copérnico só autorizou a divulgação de seus dados matemáticos que comprovaram a teoria após sua morte.

Três anos após sua morte nasceu o dinamarquês Tycho Brahe (1546 - 1601), um grande astrônomo observacional antes da invenção do telescópio. Um ano antes de sua morte, contratou o jovem Johannes Kepler (1571 – 1630) para ajudá-lo nas análises de dados sobre os planetas, obtidos em 20 anos de observações.

Com a morte de Tycho Brahe, Kepler “herdou” seus dados que o ajudaram a determinar a órbita de Marte e da Terra e assim chegar às conclusões apresentadas no livro “Astronomia Nova” onde ele fala sobre as leis das órbitas e das áreas.

**Figura 5** - Modelo Heliocêntrico



**Fonte:** o próprio autor

Contemporâneo a Kepler, italiano Galileu Galilei (1564 – 1642), iniciou suas observações telescópicas com um telescópio construído por ele mesmo<sup>8</sup>. Considerado o pai da moderna física experimental e da astronomia telescópica, suas observações proporcionaram vasta quantidade de evidências contribuindo muito para a teoria heliocêntrica.

Galileu fez várias descobertas observando o céu, como por exemplo, quatro luas de Júpiter, chamadas de galileanas: Io, Europa, Ganimedes e Calisto.

Mais tarde, o inglês Isaac Newton (1642 – 1727) influenciado por Galileu e por Kepler, pesquisou sobre o movimento dos planetas durante muitos anos, chegando à Teoria da Gravitação Universal. Essa teoria foi desenvolvida graças ao Cálculo Diferencial e Integral que permitiu que várias grandezas físicas se relacionassem entre si de maneira coerente, permitindo o desenvolvimento da Mecânica<sup>9</sup>.

Em sua teoria, Newton diz que se duas partículas com massas  $m_1$  e  $m_2$  estão separadas por uma distância  $d$  através de um efeito da interação gravitacional, a partícula 2 exerce uma força  $F$  sobre a partícula 1 e a partícula 1 exerce uma força  $-F$  sobre a partícula 2. A Teoria da Gravitação Universal de Newton estabelece que o valor desse módulo é dado pela expressão:

$$F = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

em que  $G$  é a constante da gravitação universal (a mesma para todos os corpos):  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \text{ kg}$

A expressão acima vale também para corpos esféricos e homogêneos. Nesse caso,  $d$  representa a distância entre os centros dos corpos.

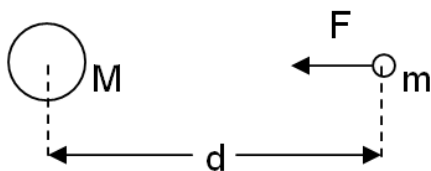
Por ser a força inversamente proporcional ao quadrado da distância, esta interação gravitacional se estende até o infinito sendo considerada de longo alcance mesmo sendo a constante da gravitação universal  $G$  muito pequena. Apenas corpos com grandes massas podem gerar efeitos ponderáveis.

Para falar sobre o conceito de campo gravitacional, pode-se considerar um corpo esférico e homogêneo de massa  $M$  e uma partícula de massa  $m$ , separados por uma distância  $d$ .

**Figura 6** - Força gravitacional

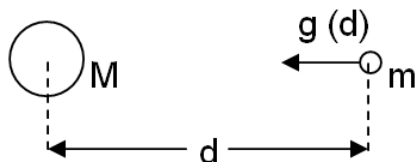
<sup>8</sup> A invenção do telescópio é creditada ao fabricante de lentes Hans Lippershey, em 1608.

<sup>9</sup> <http://cftc.cii.fc.ul.pt/PRISMA/capitulos/capitulo1/modulo5/topico6.php>



**Fonte:** o próprio autor

**Figura 7 -** Campo gravitacional



**Fonte:** o próprio autor

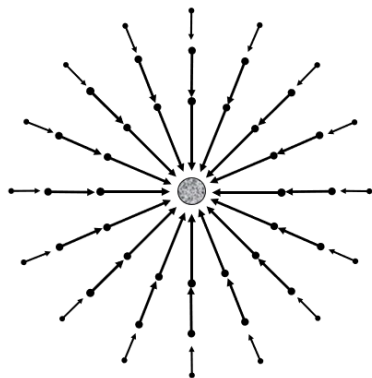
O corpo e a partícula se atraem pela força gravitacional dada por Newton, mas a atenção será dirigida à partícula. O módulo da força que o corpo exerce sobre a partícula é descrito por:

$$F = \left( \frac{G \cdot M}{d^2} \right) m$$

Observa-se que o tempo não aparece nessa expressão. Caso a partícula mude de posição, o módulo da força que o corpo exerce sobre ela muda no mesmo instante, independentemente de quão distante do corpo a partícula se encontre. Assim, pode-se dizer que a lei da gravitação universal de Newton incorpora o conceito de interação à distância.

Neste pensamento, é possível pensar na interação do corpo com a partícula de outra forma, associando um vetor  $g(d)$  ao ponto em que se encontra a partícula. Esse vetor tem a mesma direção e o mesmo sentido da força  $F$ , que o corpo exerce sobre a partícula, e módulo:

$$g(d) = \frac{G \cdot M}{d^2}$$

**Figura 8** - Vetores campo gravitacional

**Fonte:** o próprio autor

O conjunto dos vetores associados a todos os pontos do espaço (até o infinito) é o que pode ser chamado de campo gravitacional do corpo de massa  $M$ . O campo gravitacional é um campo vetorial e como o módulo do campo gravitacional tem unidade de aceleração, ele é um campo de acelerações. Quando uma partícula é colocada num ponto do espaço, aparece, sobre ela, uma força gravitacional devido a esse campo. O campo atua, dessa forma, como um intermediário entre o corpo e a partícula.

### 3.3 A Relatividade

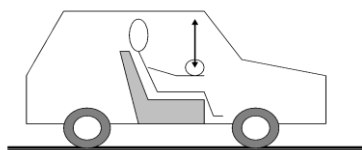
Sabemos que o movimento é relativo. A velocidade depende de um referencial. Dessa forma várias grandezas que dependem da velocidade também podem ser consideradas relativas, como a energia cinética e a quantidade de movimento.

Porém algumas grandezas sempre foram tratadas como absolutas, ou seja, não dependem do referencial, como o comprimento, o tempo e a massa. Seria estranho dizer que o comprimento de um túnel ou a massa de um carro depende do referencial. No entanto as grandezas comprimento, massa e tempo, absolutas na mecânica clássica, também são relativas. Essa relatividade é evidenciada em situações em que as velocidades são muito alta, com ordem de grandeza próximas à velocidade da luz no vácuo, não que seja impossível obter em situações cotidianas, mas muito difícil sua observação.

### 3.3.1 Relatividade Newtoniana

Por volta de 1610, Galileu Galilei afirma que as mesmas leis físicas descrevem experiências mecânicas quando feitas em referenciais que se movem, um em relação ao outro, com velocidade constante. Por exemplo, suponha que você esteja em um carro que se move em uma estrada reta com velocidade escalar constante de 80 km/h. Você e o carro estão com a mesma velocidade. À beira da estrada encontra-se um homem parado que observa o seu carro em movimento com velocidade de 80 km/h. Dentro do carro você atira uma pequena bola para cima que sobe e desce caindo exatamente sobre a mão que a lançou. Para você a trajetória da bolinha foi apenas um segmento de reta vertical.

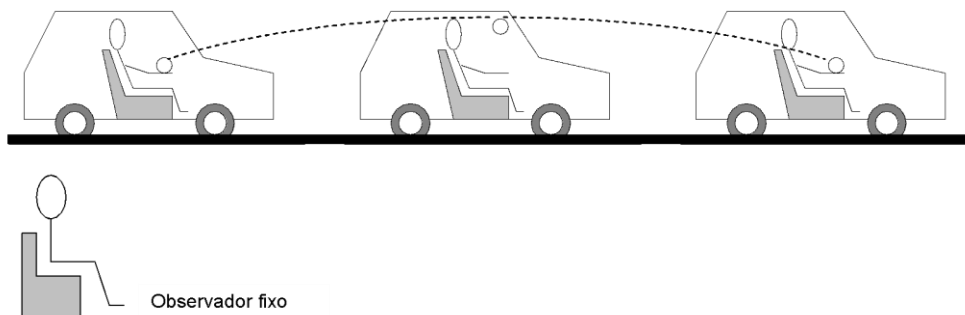
**Figura 9** - Lançamento vertical para cima, dentro do carro.



**Fonte:** o próprio autor

Porém não se pode esquecer que a bola tem movimento horizontal (por causa do movimento do carro), mas como você também tem o mesmo movimento horizontal, não há movimento relativo. No entanto, para o homem à beira da estrada, parado, o resultado é diferente. A bola tem um componente de velocidade para frente de 80 km/h e um componente vertical resultante do movimento que ela recebeu de você. Dessa forma sua trajetória será parabólica.

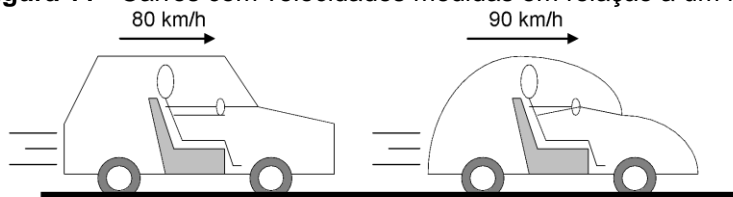
**Figura 10** - Trajetória da bola, em relação a um referencial parado na estrada, após lançamento vertical para cima dentro de um carro em movimento.



**Fonte:** o próprio autor

Agora imagine o caso em que um carro com o velocímetro marcando 90 km/h, passa por você, no mesmo sentido. Para você, este carro estaria se afastando com velocidade de 10 km/h ( $90 \text{ km/h} - 80 \text{ km/h}$ ).

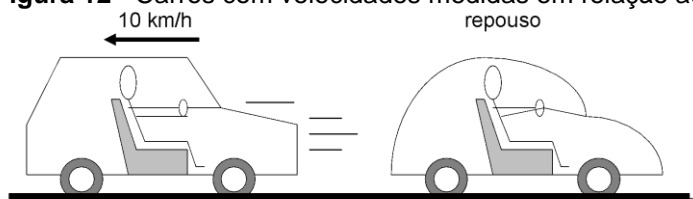
**Figura 11** - Carros com velocidades medidas em relação a um referencial fixo na estrada.



**Fonte:** o próprio autor

Se você eliminasse referenciais externos (a paisagem, o ar que passa pelo carro, as irregularidades da estrada, o barulho do motor) e considerasse somente os dois carros, não teria como determinar qual dos carros estaria se movendo. O carro que passa poderia estar em repouso e você poderia estar se movendo para trás a 10 km/h;

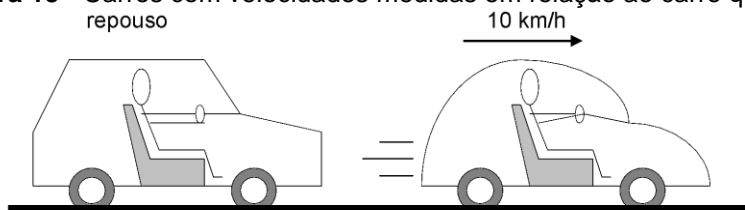
**Figura 12** - Carros com velocidades medidas em relação ao carro que está na frente.



**Fonte:** o próprio autor

ou você estaria em repouso e o carro que passa estaria a 10 km/h e mesmo assim o resultado observado seria o mesmo.

**Figura 13** - Carros com velocidades medidas em relação ao carro que está atrás.



**Fonte:** o próprio autor

Newton, generaliza as observações feitas por Galileu e conclui: “Todo referencial que esteja se movendo com velocidade constante em relação a um

referencial inercial também é um referencial inercial. As Leis de Newton são invariantes em todos os referenciais inerciais.”

Dessa forma, se dois referenciais inerciais estão em movimento com velocidade constante, um em relação ao outro, não haverá experiência mecânica que possa afirmar qual está em repouso e qual está em movimento, ou ambos estão em movimento.

“Não é possível perceber o movimento absoluto.”

Este é o princípio da relatividade newtoniana.

### 3.3.2 Teoria Da Relatividade Restrita

Aos 16 anos, Einstein<sup>10</sup> imaginou uma situação que o deixou intrigado. Imagine uma pessoa se olhando num espelho. Ele vê sua imagem, pois a luz ao chegar ao espelho é refletida voltando para seus olhos.

No entanto, o que deve acontecer com sua imagem se o espelho estivesse se movimentando com a velocidade da luz no vácuo, ou seja, a 300 000 km/s?

De acordo com a relatividade newtoniana (mecânica clássica) a luz não deveria alcançar o espelho, pois tanto o espelho como a luz estão no mesmo sentido e com a mesma velocidade e dessa forma a imagem deveria desaparecer.

Baseado nas equações de Maxwell, onde a velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os observadores inerciais e de que toda teoria física deve ser descrita por leis válidas para qualquer sistema de referência inercial, Einstein derivou as mesmas equações de duas hipóteses fundamentais: a invariância da velocidade da luz,  $c$ , e a necessidade de que as leis da física sejam iguais em diferentes sistemas inerciais para diferentes observadores.

#### 3.3.2.1 Experiência De Michelson

No século XIX, os físicos consideraram necessário um meio material para que tanto a luz como as ondas eletromagnéticas pudessem se propagar. Chamaram de “éter” o meio que estaria em todo o espaço dando a sustentação necessária para a

---

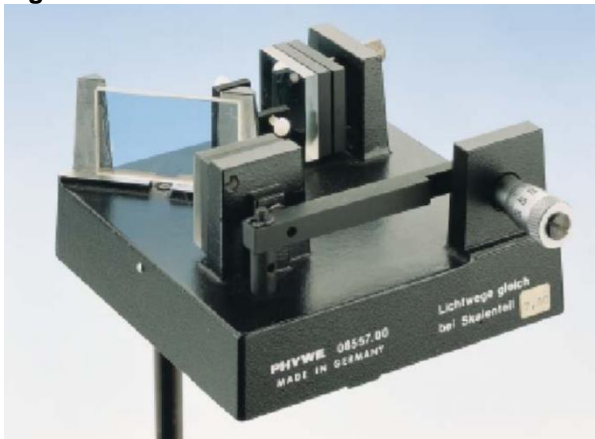
<sup>10</sup> Documentário sobre Albert Einstein: <https://www.youtube.com/watch?v=UnSA27a00To>

propagação dessas ondas. Imaginava-se que a velocidade de 300 000 km/s ( $c$ ) da luz, seria medida num sistema de coordenadas em repouso em relação ao éter.

Sabendo que a Terra também deveria se mover em relação ao éter, era esperado uma diferença entre a velocidade da luz medida no referencial do éter e no referencial Terra.

Para determinar a suposta diferença, em 1881, o físico americano Albert Abraham Michelson construiu pela primeira vez um interferômetro de ondas luminosas.

**Figura 14** - Interferômetro de Michelson

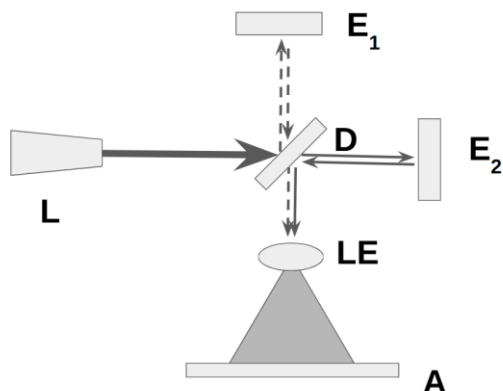


**Fonte:** [http://www.plnciencia.com.br/roteiros/0228\\_UFES.pdf](http://www.plnciencia.com.br/roteiros/0228_UFES.pdf)

O experimento consiste em dividir um feixe de luz em dois e, em seguida, recombiná-lo, resultando em interferência. A divisão do feixe de luz é concretizada quando o mesmo incide com ângulo de  $45^\circ$  sobre um espelho semitransparente (divisor de feixe) de modo que metade da luz incidente será refletida e a outra metade o atravessará. A luz refletida e transmitida são refletidas por outros espelhos reenviando-os ao divisor.

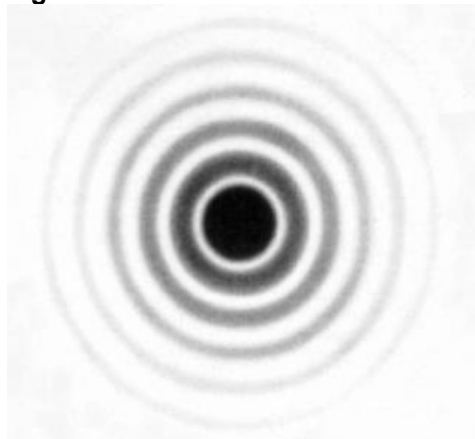
Após atravessá-lo, os feixes são expandidos por uma lente (convergente ou divergente) e, ao se sobreporem, geram as "franjas de interferência" (zonas claras e escuras), as quais podem ser visualizadas num anteparo.

**Figura 15** - O esquema apresenta uma montagem do interferômetro de Michelson. L é a fonte de luz, em geral um laser, D é o espelho semitransparente (divisor de feixe), E<sub>1</sub> e E<sub>2</sub> são espelhos, LE é a lente expansora e A, o anteparo. Uma parte do feixe de luz foi representado por setas pontilhadas e o outro por setas cheias.



**Fonte:** o próprio autor

**Figura 16** - Padrão de interferência de fonte pontual.



**Fonte:** <https://noic.com.br/materiais-astronomia/curso-noic-de-astronomia/telescopios-e-detectores/razao-focal-resolucao-e-escala-de-placa/>

No procedimento experimental, Michelson mediu as posições das franjas e depois rotacionado em 90° todo o aparelho, de forma que os raios de luz tiveram suas direções de propagação alteradas. Se houvesse diferença entre a velocidade de propagação da luz no “éter” e na Terra, essa rotação deslocaria as franjas de interferência. Após a realização de várias tentativas, não foi observado deslocamento das franjas de interferência. Ainda assim, a hipótese do “éter” não foi descartada.

### 3.3.2.2 Postulados Da Relatividade

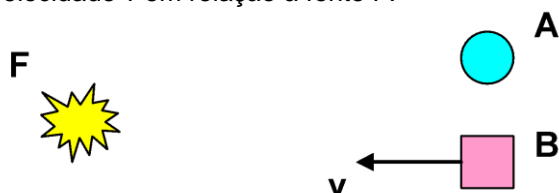
Foram formuladas várias hipóteses para explicar os resultados negativos da experiência de Michelson, que deveria observar o movimento da Terra em relação ao éter. Uma delas foi proposta por George FitzGerald e desenvolvida por Hendrik Lorentz. A ideia era que quando um corpo está em movimento, seu comprimento diminui na direção do movimento. Essa contração poderia explicar o resultado não favorável ao observado pelo experimento de Michelson-Morley. A solução era feita por várias transformações matemáticas que ficaram conhecidas por transformações de FitzGerald-Lorentz.

Em 1905, Albert Einstein, publicou um artigo onde deduz dois postulados:

- Postulado 1: “As leis da física são as mesmas em todos os sistemas inerciais. Não existe nenhum sistema de referência inercial preferencial.”
- Postulado 2: “A velocidade da luz no vácuo é igual para todos os sistemas de referência inerciais. Ela não depende nem da velocidade do emissor, nem da velocidade do receptor do sinal luminoso.”

Observa-se que o postulado 1 é uma generalização do princípio da relatividade newtoniana e as leis da mecânica como as leis do eletromagnetismo devem ter a mesma forma em qualquer referencial inercial. O postulado 2 contraria totalmente a relatividade newtoniana. A principal consequência dos postulados é que se um observador medir a velocidade da luz, encontrará sempre o mesmo valor. Considere dois observadores A e B e uma fonte luminosa F, em que A está em repouso em relação a F e B em movimento em relação a F, com velocidade  $v$ .

**Figura 17** - F – fonte de luz; A – observador em repouso em relação à fonte F; B – observador com velocidade  $v$  em relação à fonte F.

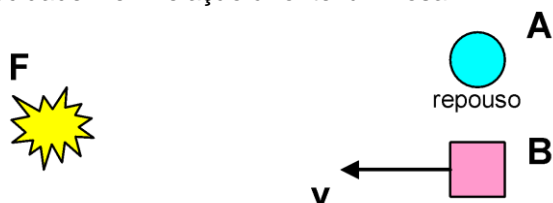


**Fonte:** o próprio autor

Para o observador A a velocidade da luz medida é  $c$ . Qual a velocidade da luz medida para B? Não é  $c + v$ . Por quê? No postulado 1 sabe-se que não se pode

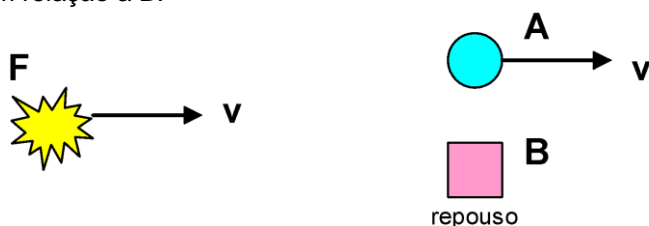
perceber o movimento absoluto, ou seja, não se pode afirmar quem está em movimento e quem está em repouso. Neste caso poderia estar ocorrendo os dois casos apresentados nas figuras a seguir:

**Figura 18** - A é um observador em repouso em relação à fonte luminosa F e B é um observador com velocidade  $v$  em relação à fonte luminosa F.



**Fonte:** o próprio autor

**Figura 19** - B está em repouso e a fonte de luz F e o observador A estão em movimento com velocidade  $v$  em relação a B.



**Fonte:** o próprio autor

O postulado 2, diz que a velocidade da luz de uma fonte em movimento não vai depender da velocidade da fonte. Isto é, a velocidade da luz para qualquer observador será a mesma, ou seja,  $c$ . em outras palavras: “Qualquer observador sempre mede o mesmo valor para a velocidade da luz.”

Além da velocidade da luz desempenhar um papel especial, pelos postulados da teoria da relatividade, a velocidade da luz no vácuo é a velocidade máxima possível de transmissão na natureza.

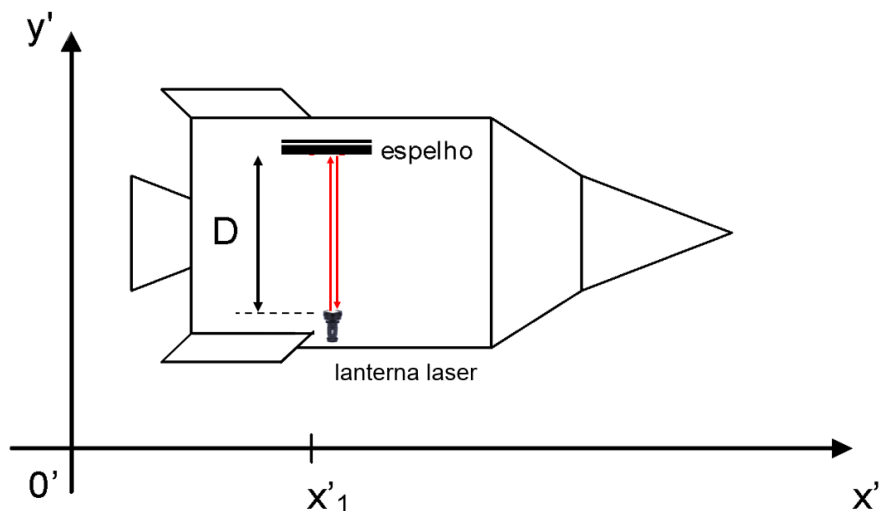
### 3.3.2.3. Dilatação Do Tempo

No link abaixo temos um vídeo lúdico do que é apresentado no texto a seguir:

<https://www.youtube.com/watch?v=KU7I4nOQiDo>

Considere uma espaçonave a altíssima velocidade. Com o observador dentro da espaçonave num sistema cartesiano  $x'y'$  com origem em 0 que está com velocidade  $v$ , o movimento da luz é vertical.<sup>11</sup>

**Figura 20** - Trajetória da luz para o observador no sistema  $x'y'$  em repouso em relação à nave.



**Fonte:** o próprio autor

Para facilitar os cálculos, considere o tempo gasto pelo pulso de luz que sai da fonte de luz e vai até o espelho  $\Delta t' = \Delta t_{\text{nave}}$ . Considerando também  $\Delta x = D$  a distância entre a fonte e o espelho, tem-se:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

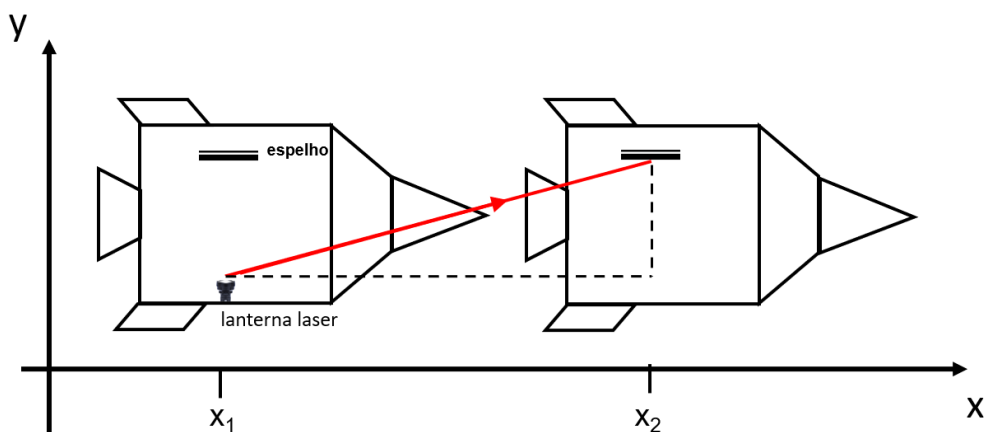
$$c = \frac{D}{\Delta t'} \quad (2)$$

$$\Delta t' = \frac{D}{c} \quad (3)$$

Por outro lado, se o observador estiver parado, por exemplo, na Terra, num sistema cartesiano  $xy$  com origem 0 e a espaçonave estiver em movimento com velocidade  $v$ , o pulso percorrerá uma distância maior.

<sup>11</sup> veja os vídeos: <https://www.youtube.com/watch?v=yuD34tEpRFw&t=357s>  
<https://www.youtube.com/watch?v=pBQjsOaRHxg>

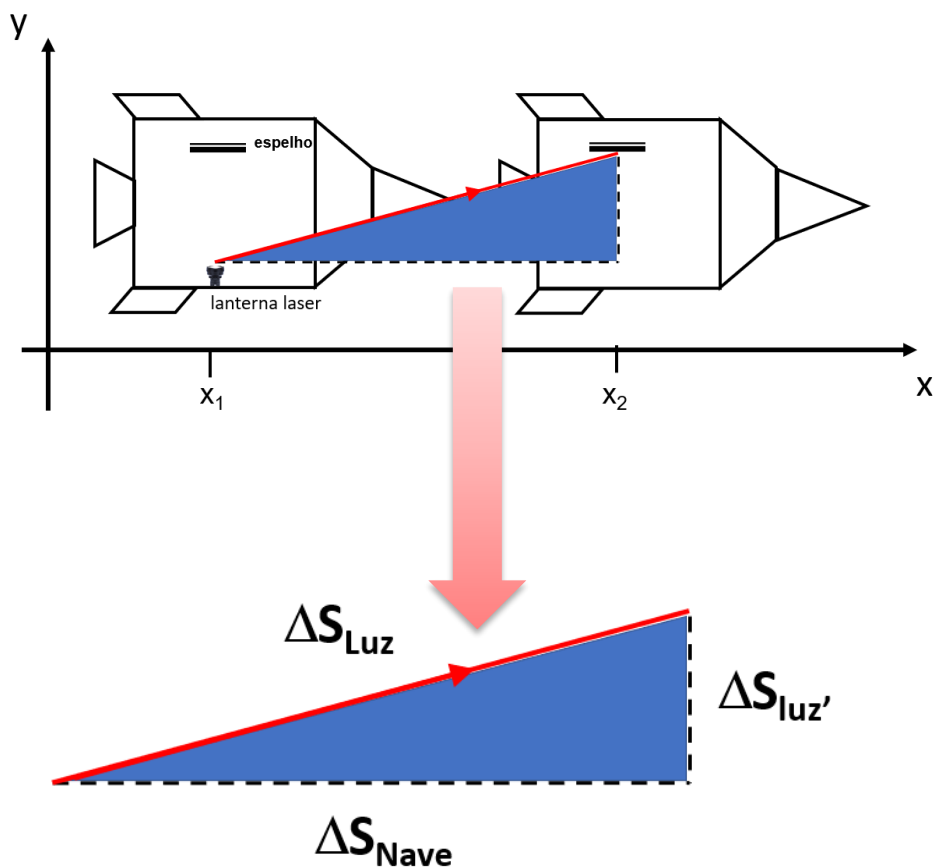
**Figura 21** - Trajetória da luz numa nave se movimentando em relação ao eixo xy



**Fonte:** o próprio autor

Mas como a velocidade da luz é sempre a mesma (não depende do referencial) e a distância percorrida é maior, então a o intervalo de tempo será maior.

**Figura 22** - Deslocamento da Luz em relação aos referenciais xy e x'y'.



**Fonte:** o próprio autor

Onde:

$\Delta S_{\text{luz}}$  → deslocamento da luz para um observador em repouso na Terra.

$\Delta S_{\text{luz}'}$  = D → deslocamento da luz para um observador em repouso na Nave.

$\Delta S_{\text{nave}}$  → deslocamento da nave para um observador em repouso na Terra

Aplicando o teorema de Pitágoras, no triângulo retângulo destacado na figura anterior (fora de escala), tem-se:

$$(\Delta S_{\text{luz}})^2 = (\Delta S_{\text{nave}})^2 + (\Delta S_{\text{luz}'})^2 \quad (4)$$

$$(c \cdot \Delta t)^2 = (v \cdot \Delta t)^2 + (D)^2 \quad (5)$$

$$c^2 \cdot \Delta t^2 = v^2 \cdot \Delta t^2 + D^2 \quad (6)$$

$$c^2 \cdot \Delta t^2 - v^2 \cdot \Delta t^2 = D^2 \quad (7)$$

$$(c^2 - v^2) \cdot \Delta t^2 = D^2 \quad (8)$$

$$\Delta t^2 = \frac{D^2}{c^2 - v^2} \quad (9)$$

$$\Delta t^2 = \frac{D^2}{c^2 - v^2} \rightarrow \text{colocando } c \text{ em evidência no denominador, tem-se} \quad (10)$$

$$\Delta t^2 = \frac{D^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (11)$$

$$\Delta t = \sqrt{\frac{D^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad (12)$$

$$\Delta t = \frac{D}{c \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad (13)$$

Como já visto (equação 1),  $\Delta t' = \frac{D}{c}$ , tem-se: (14)

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad \text{onde } \Delta t = \Delta t_{\text{terra}} \quad (15)$$

A expressão  $\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}$  é chamada de fator de Lorentz que pode ser (16)

representada por  $\gamma \left( \gamma = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \right)$  e será maior que 1. (17)

Observe que para valores de velocidade  $v$  pequenos, como no nosso cotidiano, o resultado previsto pela teoria da relatividade será semelhante ao da física clássica, porque  $v$  será muito menor que  $c$  e assim a razão  $\frac{v^2}{c^2}$  tende a zero. (18)

### 3.3.2.4 Contração Do Espaço

Imagine que um indivíduo deseja medir o comprimento de uma barra. É só usar uma régua. Mas se ele estiver em movimento ficará mais difícil. Usando um cronômetro, pode-se medir o tempo da passagem da barra por uma determinada posição e assim determinar seu comprimento multiplicando a velocidade da barra e o tempo que ela levou para passar pela posição. Mas qual tempo usar, já que intervalos de tempo dependem do referencial?

Para o observador em movimento com velocidade  $v$ , o comprimento seria  $L'$  e o tempo medido  $\Delta t'$ , então:

$$L' = v \cdot \Delta t' \quad (19)$$

Para um observador em repouso, o comprimento seria  $L_0$ , chamado de comprimento próprio, e o tempo medido  $\Delta t$ , então:

$$L_0 = v \cdot \Delta t \quad (20)$$

Fazendo uma razão entre as expressões, tem-se:

$$\frac{L'}{L_0} = \frac{v \cdot \Delta t'}{v \cdot \Delta t} \quad (21)$$

$$L' = L_0 \frac{\Delta t'}{\Delta t}, \text{ sabendo que } \frac{\Delta t'}{\Delta t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \text{ tem-se:} \quad (22)$$

$$L' = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ ou } L' = \gamma L_0 \quad (23)$$

Observadores em movimento, sempre medirão um comprimento menor.

### 3.3.3 Relatividade Geral

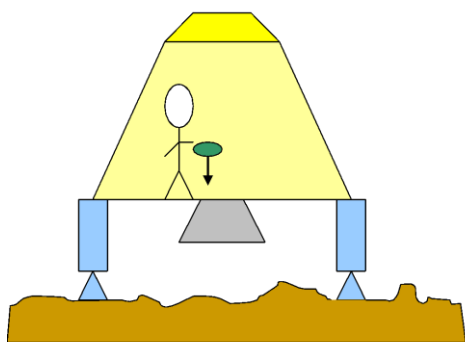
A teoria da relatividade restrita recebe tal nome porque é válida somente para sistemas inerciais (não sofrem aceleração). 10 anos se passaram para que Albert Einstein chegasse ao término de sua Teoria da Relatividade Geral, onde contempla o estudo de sistemas não inerciais ou de sistemas que sofrem aceleração.

### 3.3.3.1 A Proposta Para Explicar Os Efeitos Gravitacionais

Na física clássica sabe-se que todos objetos, independente da massa, caem com a mesma aceleração  $g$ .

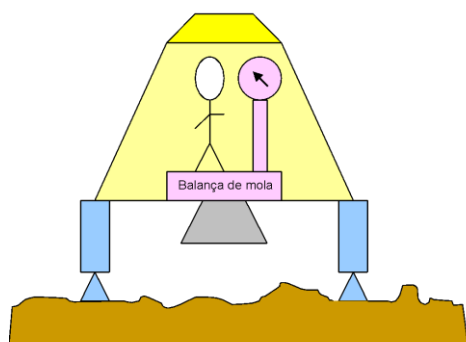
Imagine um observador dentro de uma espaçonave em repouso na superfície da Terra. Ao soltar um objeto dentro da nave, verá o corpo cair com uma aceleração igual a  $g$ . Se subir em uma balança de mola (dinamômetro) fará a leitura de seu peso.

**Figura 23** - Observador solta um corpo em uma espaçonave em repouso.



**Fonte:** o próprio autor

**Figura 24** - Observador sobre uma balança de mola em uma espaçonave em repouso.

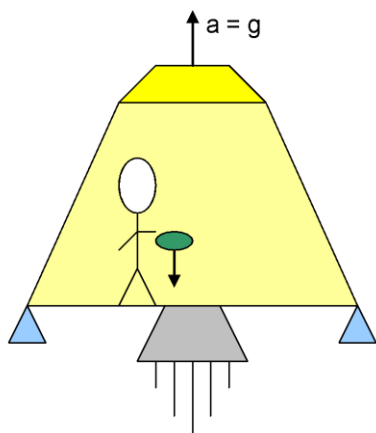


**Fonte:** o próprio autor

Agora imagine a mesma nave numa região onde não existe qualquer influência do campo gravitacional da Terra, ou de qualquer outro astro. Esta nave está sendo acelerada com aceleração  $a = g$  pelos motores da nave. Nesta nova situação o observador ao soltar o objeto deverá observar sua queda com a mesma aceleração  $g$

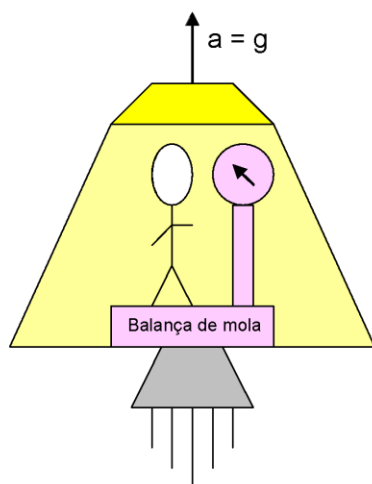
que tinha quando na Terra e observará o mesmo peso indicado pela balança quando estiver sobre ela.

**Figura 25** - Observador solta um corpo em uma espaçonave que sobe acelerada com aceleração igual a  $g$ .



**Fonte:** o próprio autor

**Figura 26** - Observador sobre uma balança de mola em uma espaçonave que sobe acelerada com aceleração igual a  $g$ .



**Fonte:** o próprio autor

Assim verifica-se que não há como saber se ele está na Terra ou no espaço. A esta situação dá-se o nome de “Princípio de equivalência”.

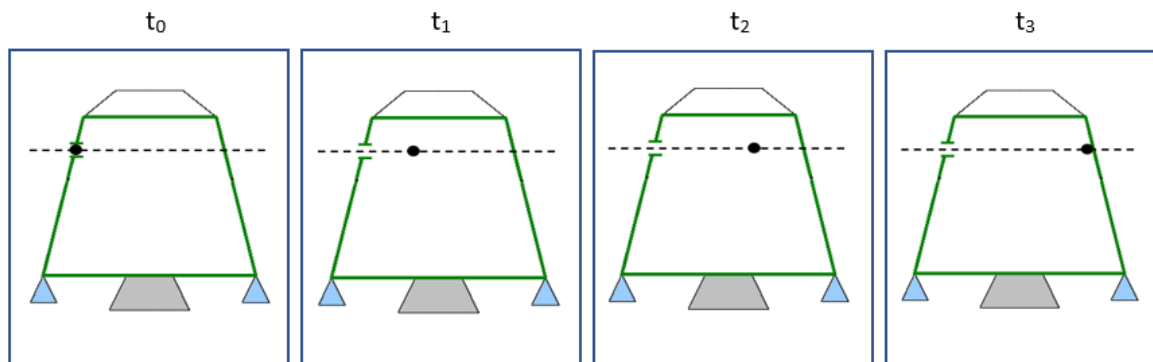
Acevedo, Morais e Pimentel salientam que “por originar-se de uma conclusão empírica, é natural que o Princípio de Equivalência tenha sido testado experimentalmente em suas diferentes formulações. Mais ainda, por conta de ter sido elevado à categoria de princípio, ele tem grandes implicações na física atual. Por estes e outros motivos, é muito importante avaliá-lo experimentalmente tão precisamente

quanto for possível.” De fato, Newton fez estudos para sua comprovação experimental, mas apesar da precisão obtida, aprimoramentos nos resultados eram necessários.

Para Einstein o princípio de equivalência se aplicava a toda física, ou seja, não é possível uma experiência distinguir um movimento uniformemente acelerado e a presença de um campo gravitacional. Acevedo, Moraes e Pimentel afirmam que “o próprio Einstein reconheceu, o Princípio de Equivalência é considerado a base fundamental da teoria da Relatividade Geral.”

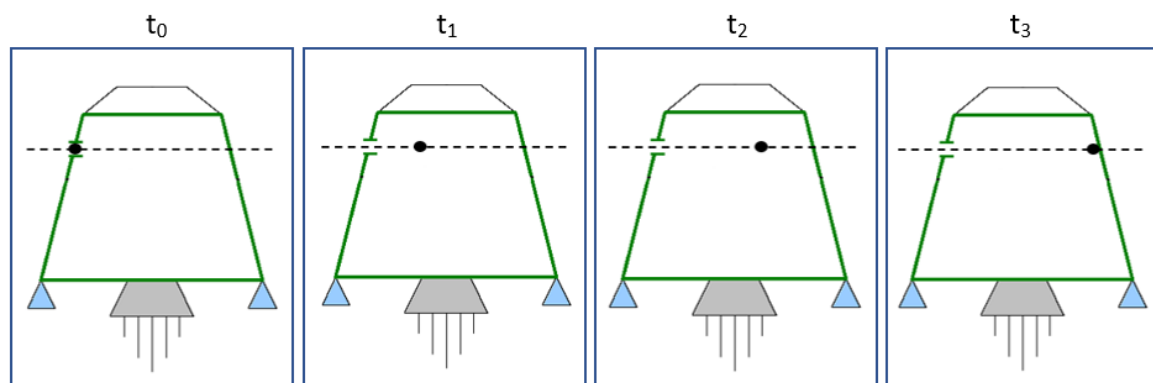
Uma nova ideia é considerada: imagine um feixe de luz entrando por uma pequena janela numa nave que se move com velocidade constante. pelos postulados de Einstein tem-se um sistema inercial e neste caso não existe nenhum sistema inercial preferencial, assim a velocidade da luz e sua trajetória não são afetados, nem pelo movimento do emissor, nem pelo movimento do receptor do sinal luminoso.

**Figura 27** - Pulso de luz que atravessa uma espaçonave em repouso.



**Fonte:** o próprio autor

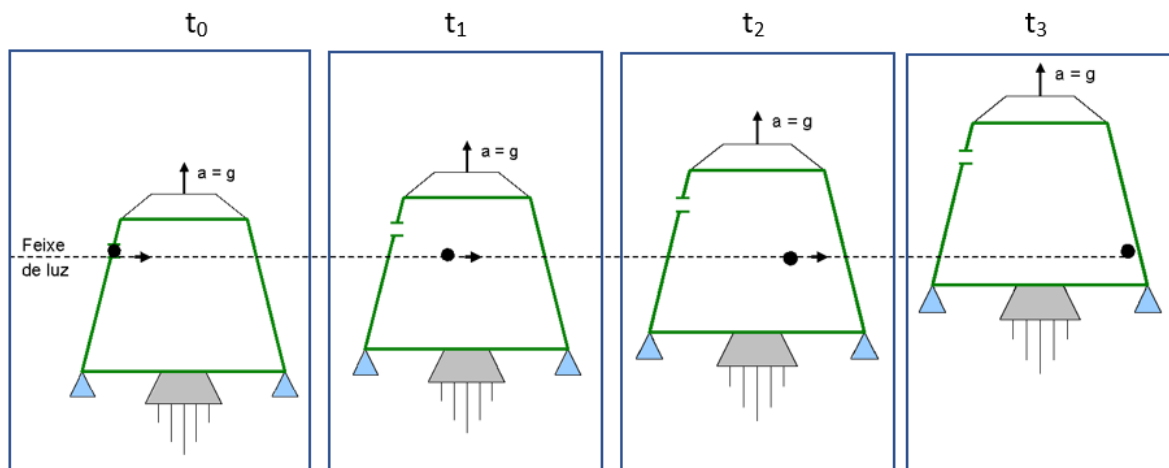
**Figura 28** - Pulso de luz que atravessa uma espaçonave subindo com velocidade constante.



**Fonte:** o próprio autor

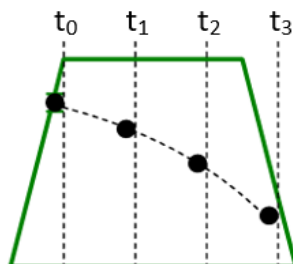
Mas, se a nave é impulsionada com determinada aceleração. A luz atravessa a nave com velocidade  $c$  e chegará à parede oposta da nave um pouco abaixo da altura em que entrou, pois no intervalo de tempo que a luz atravessa a nave, a nave sobe acelerada uma determinada altura. O observador, dentro da nave, percebe que o raio de luz fez uma curva parabólica.

**Figura 29** - Pulso de luz que atravessa uma espaçonave subindo acelerada com aceleração igual a  $g$ .



**Fonte:** o próprio autor

**Figura 30** - Pelo princípio da equivalência, um observador numa nave acelerada veria a luz se desviar. A luz deve igualmente se curvar ao passar perto de massas muito grandes.



**Fonte:** o próprio autor

Pelo princípio da equivalência, a caixa acelerada é indistinguível fisicamente de um campo gravitacional uniforme, assim, tanto um observador dentro da nave como um observador parado na superfície da Terra deverão ver a luz se curvar, pensando que esse desvio foi causado por um campo gravitacional. É como se a luz tivesse peso e fosse atraída pelo campo gravitacional da Terra. Pelo princípio da equivalência, ele pode pensar (legitimamente) que esse desvio foi causado por um campo gravitacional.

A luz próxima da superfície da Terra é, então, acelerada, e cai com aceleração de aproximadamente  $9,8 \text{ m/s}^2$ . O efeito da queda é difícil de perceber por causa da enorme velocidade da luz ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). Para se ter uma ideia, ao percorrer 3000 km a luz leva em torno de 0,01 s e a queda da luz seria próximo de 0,5 mm.

### 3.3.3.2 A Curvatura Espaço-tempo.

As observações astronômicas do eclipse de 1919 em Sobral, no Ceará e na ilha de Príncipe, na África portuguesa foram importantes para Einstein comprovar suas previsões, publicadas em 1916, com os cálculos do desvio da luz devido a aproximação de uma grande massa.

Isaac Newton, em seu livro *Óptica* (1704) já apresentava, através das famosas “questões” que ele expunha em forma de perguntas, suas principais ideias sobre a natureza corpuscular da luz. Por exemplo, seus argumentos podem ser observados nas questões (NEWTON, 2002, p.271):

“Questão 1 - Os corpos não agem sobre a luz à distância e, por sua ação, não curvam os seus raios? E essa ação não é mais forte na distância menor?  
Questão 29 - Os raios de luz não são corpos minúsculos emitidos pelas substâncias que brilham?”

Observamos que depois de Newton, o estudo e os cálculos da curvatura na trajetória da luz foram adotados por outros físicos adotaram seu modelo. Segundo César, Pompeia e Studart (2019):

“John Michell (1724-1793) e Henry Cavendish (1731-1810), adotaram o modelo corpuscular para calcular a deflexão gravitacional da luz na tentativa de responder à Questão 1 do *óptica* de Newton...  
...No entanto, foi um astrônomo alemão, Johann Georg von Soldner (1876-1833), quem primeiro publicou, em 1801, o cálculo do valor do desvio angular devido à força gravitacional exercida sobre um raio de luz ao passar por um corpo de grande massa, como o Sol.”

O alemão Johann Georg von Soldner (1776-1833) é considerado o precursor do cálculo do encurvamento da luz sob a influência do Sol, sendo que Henry Cavendish (1731-1810), foi o primeiro a calcular o desvio, mas não publicou como afirma SOARES (2014):

“A deflexão gravitacional da luz baseada na teoria newtoniana e no modelo corpuscular da luz foi calculada, mas nunca publicada, por volta de 1784 por Henry Cavendish, quase 20 anos antes do primeiro cálculo publicado, de Johann Georg von Soldner. Os dois resultados são ligeiramente diferentes porque, enquanto Cavendish tratou de um raio de luz emitido do infinito, von Soldner tratou de um raio de luz emitido da superfície do corpo defletor. Em primeira aproximação, eles concordam um com o outro; ambos dão a metade do valor predito pela relatividade geral e confirmado pela experiência.”

Soares ainda afirma que “o encurvamento gravitacional da trajetória da luz foi o primeiro teste observacional da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein”. Usando o princípio da equivalência e suas equações, Einstein calculou o desvio da luz de uma estrela ao passar próximo à superfície do Sol e achou 0,83”, publicada em 1911.

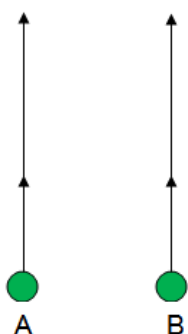
Falciano diz que:

“Einstein considerava que a relatividade restrita possuía dois fortes entraves conceituais: a manutenção de uma classe privilegiada de referenciais e a sua incompatibilidade com a gravitação newtoniana. A partir de 1907, ele percebeu que estes dois problemas estavam intimamente ligados e que, talvez, através da geometrização da gravitação eles pudessem ser simultaneamente resolvidos.”

A partir deste ponto, a ideia de Einstein era que a gravidade não é uma força comum, mas sim uma propriedade da geometria do espaço-tempo. A seguinte analogia simplificada, que substitui uma superfície bidimensional para quatro dimensões do espaço-tempo, serve para ilustrar esta ideia.

Considere o espaço vazio - no caso, um plano bidimensional - sem forças atuando entre os corpos flutuando. Se não houver forças, a mecânica clássica e a mecânica de Einstein estão de acordo. Neste caso os corpos se movem ao longo de linhas retas com uma velocidade constante.

**Figura 31** - Caminhos retos de duas partículas A e B.



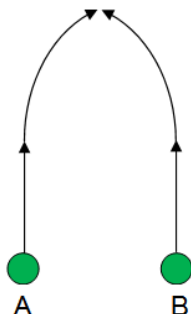
**Fonte:** o próprio autor

Estas partículas que começam a mover ao longo de trajetórias paralelas não se encontram, e vão continuar sempre a uma distância constante uma da outra.

Na física clássica, se as partículas alteram seus movimentos é porque há uma força agindo sobre elas. Estas forças devem acelerar estas partículas levando-as a deixar

as trajetórias retilíneas e seguirem trajetórias curvas. A imagem seguinte apresenta esta ideia.

**Figura 32** - As partículas A e B começam em paralelo, mas são aceleradas em direção uma à outra.

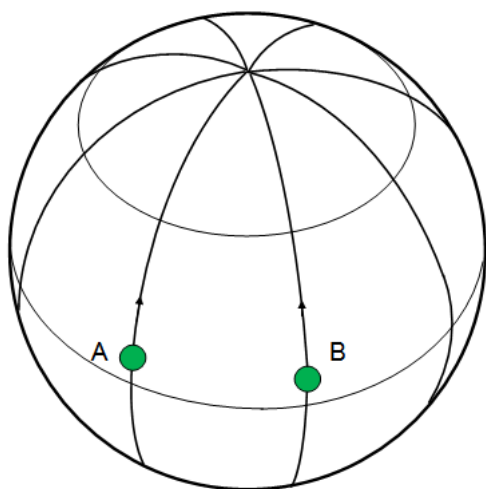


**Fonte:** o próprio autor

Pela teoria da gravitação de Newton, a gravidade é uma força que poderia acelerar as partículas e assim pode-se dizer que ambas são atraídas gravitacionalmente por um corpo maciço sendo desviadas para o seu centro de massa.

No entanto, existe uma outra possibilidade onde é possível observar a aproximação das duas partículas que iniciam o movimento em trajetórias paralelas. As duas partículas ainda poderiam estar se movimentando nas linhas retas possíveis, mas sobre uma superfície curva.

**Figura 33** - As partículas A e B em trajetórias sobre uma esfera.



**Fonte:** o próprio autor

Nessa situação, não existe força agindo nas partículas alterando suas trajetórias fazendo-as desviar-se das linhas retas possíveis. O fato de as partículas estarem em

movimento sobre uma superfície esférica significa que, mesmo que elas ainda se movem o mais reto possível, os seus caminhos irão convergir.

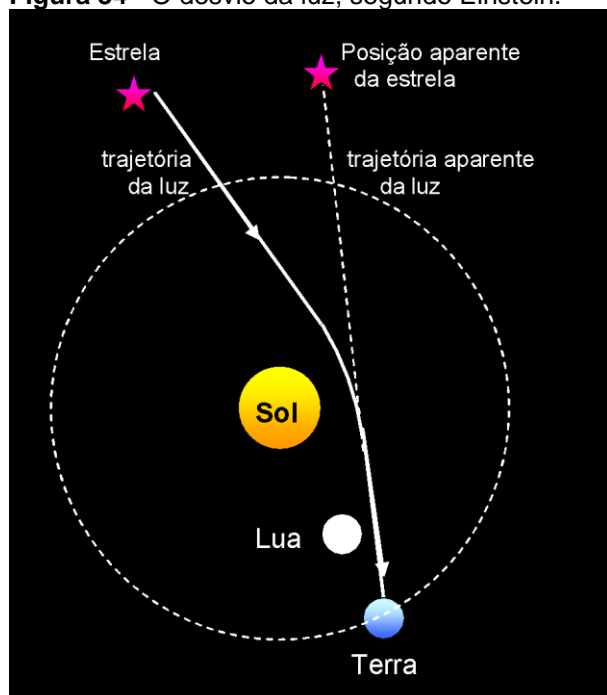
A teoria de Einstein é exatamente análoga a este. Na teoria de Newton, a gravidade faz com que as partículas deixem seus caminhos retos. Na teoria geral da relatividade de Einstein, a gravidade é uma distorção do espaço-tempo. Partículas ainda seguem os caminhos mais retos possíveis no espaço-tempo. Mas como o espaço-tempo é agora distorcido, mesmo nesses caminhos mais retos, as partículas aceleram como se elas estivessem sob a influência do que Newton chamou a força gravitacional.

Nessa nova forma de ver, não existe uma força gravitacional que massas exercem sobre outras massas. Em vez disso, há distorções de espaço-tempo. O espaço-tempo na presença de uma massa é curvo. Este espaço-tempo curvo pode ser chamado de geodésica, que é a curva de menor comprimento que une dois pontos. Na "geometria plana" (espaço euclidiano), essa curva é um segmento de reta, mas em "geometrias curvas" (geometria riemanniana), a curva de menor distância entre dois pontos pode não ser uma reta.

A deformação do espaço-tempo não ocorre apenas por causa da massa, mas também com a sua energia, tensões internas ou pressão e esta geometria distorcida faz com que a matéria não se mova de forma uniforme pois seu movimento altera a geometria espaço-tempo e esta mudança na geometria espaço-tempo pode alterar a ação sobre a matéria, alterando assim seu movimento.

Para Einstein a deflexão de um feixe de luz poderia ser observada quando a luz de uma estrela passasse próximo ao Sol. O que dificultaria seria o brilho do Sol, no entanto seria possível observar durante um eclipse do Sol, quando sua luz é bloqueada pela Lua.

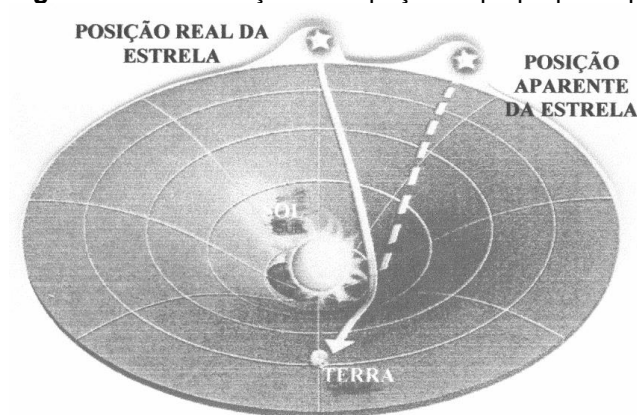
**Figura 34** - O desvio da luz, segundo Einstein.



**Fonte:** o próprio autor

Sua conclusão afirma que uma grande massa (o Sol, por exemplo) deformava a estrutura do espaço-tempo ao seu redor.

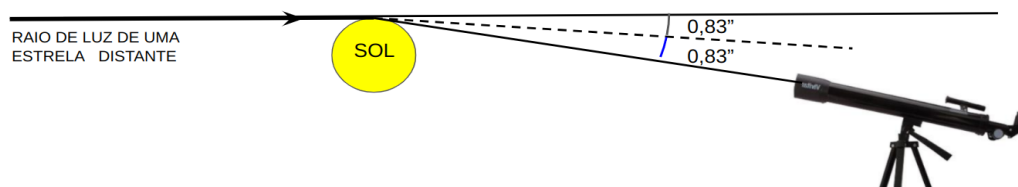
**Figura 35** - Deformação do espaço-tempo proposta por Einstein.



**Fonte:** <https://pequenoplanetaazul.wordpress.com/2011/07/09/como-a-gravidade-pode-curvar-a-luz/>

Um corpo que no espaço vazio está em movimento em linha reta, ao se aproximar de uma grande massa sofre uma mudança na trajetória devido a deformação do espaço-tempo. Com a nova ideia, Einstein refez seus cálculos, publicando em 1916 um artigo que o tornou conhecido no mundo da Física. Um raio de luz ao passar próximo do Sol, com os novos cálculos, sofreria um desvio de 1,7", o dobro do publicado em 1911.

**Figura 36** - O desvio da luz, segundo Einstein. A primeira parte se deve ao princípio da equivalência e a segunda ao encurvamento do espaço-tempo na presença de massas.



**Fonte:** o próprio autor

Esta previsão foi testada em Sobral, no Ceará e na ilha de Príncipe, na África portuguesa em 1919 e comprovada ser correta. Assim, pode-se dizer que as forças gravitacionais resultam da curvatura do espaço-tempo devido à presença de massa. Onde não existem forças gravitacionais pode-se dizer que o espaço-tempo é plano, e um corpo vai se mover em linha reta. Os corpos sempre vão percorrer o caminho mais curto entre dois pontos, mas numa superfície curva o caminho mais curto entre dois pontos não é uma reta, e sim uma curva que dependerá dos detalhes do espaço-tempo.

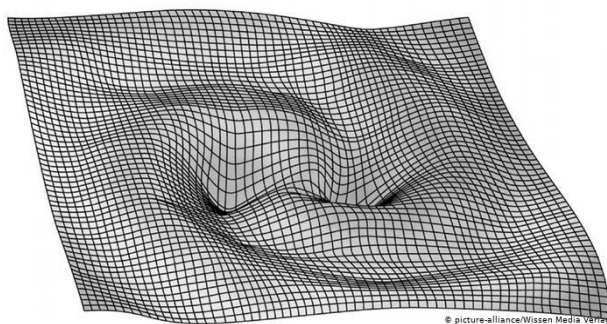
### 3.4 Ondas Gravitacionais

No ano de 2016, os cientistas anunciaram a detecção de ondas gravitacionais, fenômeno previsto pelo físico Albert Einstein na sua Teoria da Relatividade Geral, há mais de um século.

David Reitze, diretor executivo do Ligo, disse: "Esta é a primeira vez que o cosmos nos forneceu o que eu chamaria de "filme com áudio. Neste caso, o 'áudio' da trilha sonora vem da onda gravitacional das estrelas de nêutrons enquanto elas estão circulando e colidindo entre si. O vídeo é a luz que vimos".

De acordo com a Teoria Geral da Relatividade, o espaço e o tempo se fundem numa nova dimensão, o espaço-tempo. Este espaço-tempo é deformado por corpos que possuem massa e quanto maior a massa, maior será a deformação, como por exemplo, quando uma pessoa sobe sobre um colchão. Em casos em que a massa é acelerada, ocorrem ondulações no espaço-tempo. Então, as ondas gravitacionais são ondulações do espaço-tempo produzidas por fenômenos muito violentos, como, explosões e colisões entre estrelas de nêutrons ultra densas ou fusões de buracos negros, por exemplo.

**Figura 37** - Simulação da deformação do espaço-tempo por corpos com massa



**Fonte:** <https://www20.opovo.com.br/app/maisnoticias/mundo/dw/2016/02/11/noticiasdw,3573874/o-que-sao-ondas-gravitacionais-e-por-que-elas-sao-importantes.shtml>

As ondas gravitacionais atingem a Terra constantemente, porém, devido à grande distância que a Terra se encontra da origem destas ondulações, a distorção é muitas vezes menor do que a largura de um próton, fazendo com que a medição de tais mudanças de comprimento seja impossível de ser feita pela maioria dos instrumentos. Assim, para se detectar as ondas gravitacionais são necessários instrumentos sensíveis.

Para a detecção das ondas gravitacionais, em 1992, foi construído nos Estados Unidos, o observatório Ligo (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory). As primeiras tentativas de comprovar a existência das ondas gravitacionais não tiveram sucesso, mas com ajustes e novas tecnologias o laboratório chegou ao seu êxito.

O Ligo é composto por dois detectores, distantes cerca de 3 mil quilômetros um do outro, localizados em Livingston, no estado da Louisiana, e em Hanford, Washington. Os dois observatórios possuem dois túneis idênticos, em forma de L, com quatro quilômetros de comprimento cada um. Nesses túneis, lasers são lançados e através de reflexão em espelhos, obtém-se padrões de interferência. Como os detectores são sensíveis a eventos locais, como a passagem de caminhões, raios, ondas oceânicas e terremotos, o mesmo sinal precisa aparecer nas duas instalações, tanto em Washington quanto em Louisiana, para se configurar uma distorção no espaço-tempo.

Apesar do Ligo não ser o único observatório capaz de detectar ondas gravitacionais, ele foi o primeiro a detectar de forma direta.

## 4 METODOLOGIA

Com o objetivo de ensinar ondas gravitacionais, assunto esse que traz muita curiosidade aos alunos, desenvolvemos uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) que é uma Sequência Didática (SD) baseada na Teoria da aprendizagem de Ausubel. Esta UEPS foi aplicada em três turmas de diferentes níveis de ensino (3º ano EM, 2º ano EM e curso pré vestibular), sendo que a aplicação que deu origem aos resultados deste trabalho é referente à turma de 2º ano do ensino médio.

Nesta pesquisa optou-se por uma metodologia que envolvesse muita interação. Usar vídeos, simuladores e aulas invertidas para dinamismo e busca de evidências de aprendizagem significativa.

O primeiro passo foi a situação inicial com a leitura do texto: “‘Science’ elege ondas gravitacionais como a descoberta do ano”. Após a leitura, foi proposta a construção de um mapa mental sobre ondas (os alunos já trabalhavam com mapas mentais em outras disciplinas). Com esses mapas foi possível verificar o conhecimento prévio dos alunos que serão relevantes na aprendizagem.

O segundo passo foram as situações-problema. Quatro questões básicas foram elaboradas levando em conta o que foi verificado no conhecimento prévio dos alunos, preparando a introdução o conhecimento a ser ensinado.

O terceiro passo foi o aprofundamento dos conhecimentos onde os alunos tiveram contato com alguns aplicativos do projeto PhET Simulações Interativas da Universidade de Colorado Boulder<sup>12</sup>. Nestes aplicativos os alunos puderam verificar o que ocorre com uma onda mecânica criada numa corda ao alterar sua frequência, amplitude, e tensão, além de simular as reflexões com extremidades fixas e extremidades livres. Ainda nesta fase, os alunos trabalharam com o simulador de ondas eletromagnéticas

No quarto passo fomos para o nível mais alto de complexidade. Após uma explicação do professor sobre o “tecido” espaço tempo, foi proposta a construção de

---

<sup>12</sup> PhET é um projeto da Universidade do Colorado que oferece simulações de matemática e ciências. As simulações são testadas e avaliadas para assegurar a eficácia educacional. Estes testes incluem entrevistas de estudantes e observação do uso de simulação em salas de aula. As simulações podem ser executadas on-line ou copiadas para o computador. Todas as simulações são de código aberto e livres para todos os estudantes e professores.

um modelo onde os alunos participaram atentamente. Nesta atividade, foi esticado um lençol e neste foi colocada uma pedra de de massa aproximada de 2 kg. Esta pedra representava uma estrela, por exemplo: o Sol. Bolinhas de vidro foram lançadas no lençol representando o movimento dos planetas.

Concluindo a unidade, retomamos alguns fatores importantes sobre a propagação de ondas, frequência, comprimento de onda e numa breve exposição oral, seguido de um vídeo, foi explicado o funcionamento de um interferômetro, para que os alunos, numa nova situação problema, pudessem explicar como é o funcionamento do LIGO.

Moreira (2011) afirma que “a avaliação da aprendizagem deve ser feita ao longo de sua implementação, assim, o pesquisador, antes de cada aula, fez ajustes na programação para melhor ancoragem dos conhecimentos”.

As avaliações foram divididas em avaliação individual, avaliação da UEPS como instrumento de aprendizagem significativa e a avaliação da UEPS pelo professor.

#### **4.1 Pesquisa**

Ela contou com duas sondagens iniciais através do mapa mental com o tema “Ondas” e por meio de um questionário de quatro perguntas também relacionado com ondas. A avaliação diagnóstica inicial foi um passo importante para atingir os resultados esperados. Nesta avaliação inicial, pode-se:

- Identificar o conhecimento prévio de cada um dos alunos, constatando as condições necessárias para garantir a aprendizagem.
- Observar se os alunos apresentam ou não habilidades e pré-requisitos para os processos de ensino e aprendizagem.

Assim, foi possível organizar melhor o planejamento.

A sondagem final foi feita através da nova elaboração do mapa mental pelos alunos com o tema Ondas e a construção de um quadro de comparação entre as ondas eletromagnéticas e as ondas gravitacionais que permitiram verificar os indícios de aprendizagem significativa.

No final da UEPS foi realizada uma Pesquisa de Opinião em conversa informal com os alunos para se obter a impressão dos estudantes sobre a metodologia adotada.

## 4.2 Contextualização

Esta UEPS foi desenvolvida no período da tarde, em novembro de 2019, com alunos do segundo ano do E.M. de uma escola particular de São Vicente - SP. Os alunos que estudam no período da manhã foram convidados a participarem no contraturno das atividades desta UEPS. Tivemos uma adesão inicial de 12 alunos, mas durante o desenvolvimento o número de alunos participantes passou a 10. O grupo que continuou até o fim das atividades era de participantes comprometidos e muito interessados em todas as atividades propostas. Eles foram sempre pontuais ao início dos encontros e sempre dispostos a continuar caso o encontro se prolongasse. Como eram muito comunicativos, foi mais fácil observar a progressão do conhecimento.

As aulas foram feitas numa sala de aula padrão com lousa de giz, e kit multimídia disponível para o professor e os alunos tinham acesso à internet wi-fi que foi utilizado em seus smartphones e na sala Steve Jobs do colégio que possui desktops e tablets para os alunos.

## 4.3. Atividades Desenvolvidas

As atividades desta UEPS foram desenvolvidas em 6 encontros com aulas que duraram entre 40 minutos e 90 minutos. Durante os encontros o pesquisador ficou atento às evidências de aprendizagem e após cada encontro era verificada a necessidade de alguma alteração ou complemento para as atividades a seguir.

1º Encontro - TEMA: O QUE JÁ SABEMOS?

Objetivo específico	Conteúdos
Verificar o conhecimento dos alunos sobre ondas	Texto sobre a comprovação da existência das ondas gravitacionais

No início do encontro, o professor explicou aos alunos como seriam as estratégias a serem adotadas durante as atividades e fez uma breve explicação sobre a construção de um mapa mental. Foi observado que os alunos já possuíam

conhecimento de sua construção. Em seguida foi entregue aos participantes o texto “‘Science’ elege ondas gravitacionais como a descoberta do ano” para leitura individual. Após a leitura, os alunos foram incentivados a elaborar um mapa mental sobre ondas, que foram entregues ao professor. Ao final da aula, o professor pediu, como atividade de casa, que os alunos pesquisassem sobre a divulgação do acontecimento e trazendo textos, ou imagens, ou vídeos sobre a observação.

## 2º Encontro - TEMA: ONDAS MECÂNICAS

Objetivo específico	Conteúdos
Compreender o conceito de ondas.	Comprimento de onda, período, frequência e velocidade de onda.

Neste encontro o professor iniciou sugerindo algumas questões para que os alunos discutissem num grande grupo:

- Como as ondas podem ser geradas?
- Como uma onda se propaga?
- Onde se percebe ondas no seu dia a dia?
- As ondas são todas iguais?
- Quais os diferentes tipos de ondas?

A discussão foi sob a mediação do professor, com a intenção de ouvir a opinião do grupo, estimular a curiosidade sobre o assunto. As considerações sobre os conceitos de ondas sugeridas pelos alunos foram anotadas no quadro e o professor apresentou suas considerações.

Após este bate papo os alunos utilizaram o aplicativo do Phet sobre ondas em uma corda ([https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-on-a-string](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string)). Manipulando o aplicativo, o aluno pode observar e identificar as mudanças na formação das ondas quando era alterada a amplitude, o período e a velocidade das fontes de ondas. Algumas questões foram pedidas aos alunos que foram respondidas e guardadas para a próxima aula:

- Explique o padrão de uma onda refletida de uma extremidade fixa e de uma extremidade solta.
- Desenvolva um método para determinar a velocidade da onda.

- Desenhe uma experiência para encontrar a relação entre a velocidade da onda, comprimento de onda e frequência.
- Meça a velocidade da onda e em diferentes níveis de tensão para determinar a relação entre velocidade e tensão.
- Verifique como duas ondas interferem.
- Qual efeito o amortecimento tem em uma onda?

Ao final da aula foi proposta uma atividade para casa onde os alunos deveriam assistir dois vídeos. O primeiro de título “Ondas eletromagnéticas” que deveria ser assistido até o minuto 5:00, podendo, caso o aluno tenha interesse, assistir todo o vídeo e o segundo de título “O que é que provoca as ondas?”, onde fala-se sobre a formação das ondas do mar e tsunami.

### 3º Encontro - TEMA: ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Objetivo específico	Conteúdos
Compreender como as ondas eletromagnéticas são geradas Identificar as diversas ondas eletromagnéticas devido a diferentes frequências.	Ondas eletromagnéticas, frequência, comprimento de onda, propagação.

Ao iniciar a aula, o professor questionou sobre o vídeo deixado como atividade de casa e discutiu pontos importantes do que foi visto como:

- quais os principais tipos de ondas eletromagnéticas?
- o que eles possuem de igualdade?
- quais as ondas eletromagnéticas que mais estão relacionadas com nosso cotidiano e o que diferenciam elas?

Na sequência os alunos tiveram a oportunidade de utilizar o aplicativo do Phet que aborda as ondas eletromagnéticas ([https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/legacy/radio-waves](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/radio-waves)) no qual a partir do movimento dos elétrons obtém-se ondas eletromagnéticas. Como este aplicativo possui alguns comandos parecidos com o que já foi usado no encontro anterior, no aplicativo de ondas na corda, o professor deixou os alunos explorarem o aplicativo. Após um tempo de exploração o professor encaminhou a aula com questionamentos:

- Ao alterar a amplitude o que ocorre com o comprimento da onda? E com a velocidade da onda?
- Ao alterar a frequência o que ocorre com o comprimento da onda? E com a velocidade?
- Ao colocar o campo mostrado em “campo estático”, o que é observado em relação ao campo elétrico criado pelo elétron?

Estas são algumas indagações que poderão ser usadas em aula. Estimule as perguntas dos alunos e comentários a respeito do assunto.

Ao final do encontro foi anotado no quadro as diferenças que os alunos perceberam das ondas mecânicas na corda do 2º encontro com as ondas eletromagnéticas de rádio deste 3º encontro.

#### 4º Encontro - TEMA: ONDAS GRAVITACIONAIS

Objetivo específico	Conteúdos
- Compreender a gravidade pela deformação espaço-tempo	- Ondas que transmitem energia por meio de deformações no espaço-tempo. - Teoria da Relatividade Geral.

O encontro começou com uma atividade prática. Os alunos juntamente com o professor construíram uma analogia do “tecido espaço-tempo”, através de uma representação bidimensional. Este modelo é útil para a visualização do espaço-tempo em 2D imersa no espaço 3D e descrever como o espaço-tempo interage com a matéria ao longo do universo. Para este modelo foi usado um lençol, uma bola de basquete e algumas bolinhas de vidro. Neste momento o professor explorou o modelo explicando as diferenças entre o conceito de gravidade de Newton de Einstein, como ondas gravitacionais podem ser geradas e como seria a deformação do tempo-espaço no caso de buracos negros.

**Fotografia 1** - Simulação da deformação tempo-espaço.



**Fonte:** Acervo do autor

Nesta atividade muitos questionamentos dos alunos surgiram, principalmente sobre buracos negros e alguns filmes de ficção científica, principalmente o filme “Interestelar”.

### 5º Encontro - A DETECÇÃO DAS ONDAS GRAVITACIONAIS

Objetivo específico	Conteúdos
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compreender como funciona um interferômetro.</li> <li>- Relacionar o funcionamento do interferômetro com o LIGO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interferômetro</li> <li>- Funcionamento do LIGO</li> </ul>

Para iniciar esta atividade, os alunos assistiram o vídeo “Interferometer Animation”. Após assistirem aos vídeos, o professor questionou os alunos quanto à compreensão do vídeo. Alguns alunos tiveram dúvidas sobre o funcionamento do interferômetro. O professor fez nova explicação e os alunos que estavam com dúvidas compreenderam o funcionamento.

Após a intervenção do professor, foi explicado como as ondas gravitacionais podem ser detectadas e como funciona o LIGO. Para isso o professor passou o vídeo “LIGO Gravitational Wave Observatory”. Após a apresentação do vídeo, o professor fez alguns questionamentos:

- Por que a necessidade de ter ao menos dois interferômetros bem distantes para a detecção de OG?

- Por que o observatório LIGO é dito “cego”?

Após uma discussão sobre os questionamentos, o professor explicou o que são estrelas de nêutrons, anãs brancas e buracos negros e na sequência foi discutida como as ondas gravitacionais poderiam ser geradas. Neste momento, os alunos voltaram a perguntar sobre os buracos negros, momento em que o pesquisador levou um tempo considerável para tirar as dúvidas dos alunos.

#### 6° Encontro - TEMA: AVALIAÇÃO

Objetivo específico
Avaliar o conhecimento adquirido

No início do encontro, o professor dividiu o quadro em duas colunas para comparar as ondas eletromagnéticas, já bem conhecidas, com as ondas gravitacionais de conhecimento novo. Com a ajuda dos alunos foi anotando as diferenças entre os dois tipos de ondas. O professor orientou os alunos com alguns questionamentos para que a comparação ficasse mais completa possível.

Após elencar todos os pontos, foi verificado com os alunos todos os quesitos pontuados, dizendo se estava correto ou não. Observamos que os alunos conseguiram compreender bem o assunto de forma que a tabela apresentou poucos erros.

Na sequência foi realizada uma avaliação individual, com os alunos fazendo novo mapa mental sobre ondas com o objetivo de diagnosticar a situação de aprendizagem de cada aluno.

No final do encontro, fizemos um bate papo onde os alunos se sentiram livres para efetuar comentários integradores sobre o assunto abordado, sobre a metodologia adotada e sobre seu aprendizado.

## 5 RESULTADOS

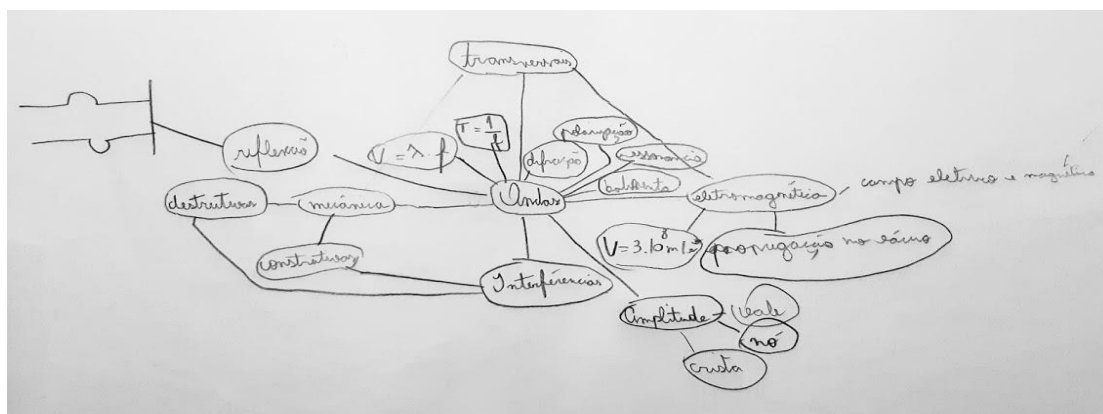
### 5.1. Análise dos mapas conceituais e avaliação

Ao analisar os mapas conceituais, esperávamos que os alunos apresentassem alguns subsunçores para a ancoragem de novos conhecimentos sobre as ondas, como:

- Ondas transportam energia
- Possuem frequência e comprimento de onda.
- Apresentam as naturezas mecânica, eletromagnética e gravitacional.
- Possuem as vibrações transversal, longitudinal e mista.
- Sofrem alguns fenômenos tais como: reflexão, refração, difração, interferência, polarização e ressonância.

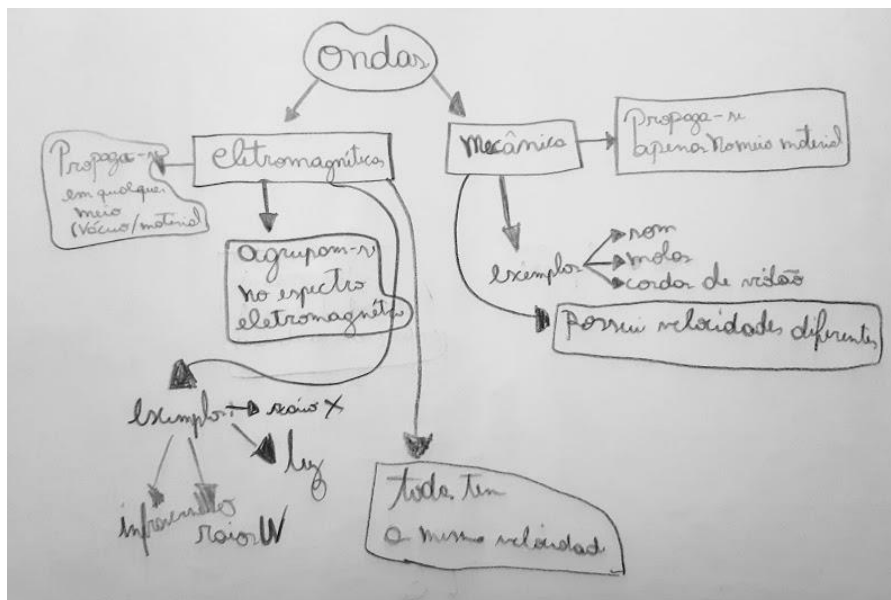
Foi possível constatar que a maioria dos alunos possuíam muitos subsunçores para ancoragem de novos conhecimentos, até mesmo aqueles que apresentaram um mapa mais simples apresentavam uma boa estrutura, como os mapas a seguir:

**Fotografia 2:** Mapa conceitual I



**Fonte:** Aluno 1

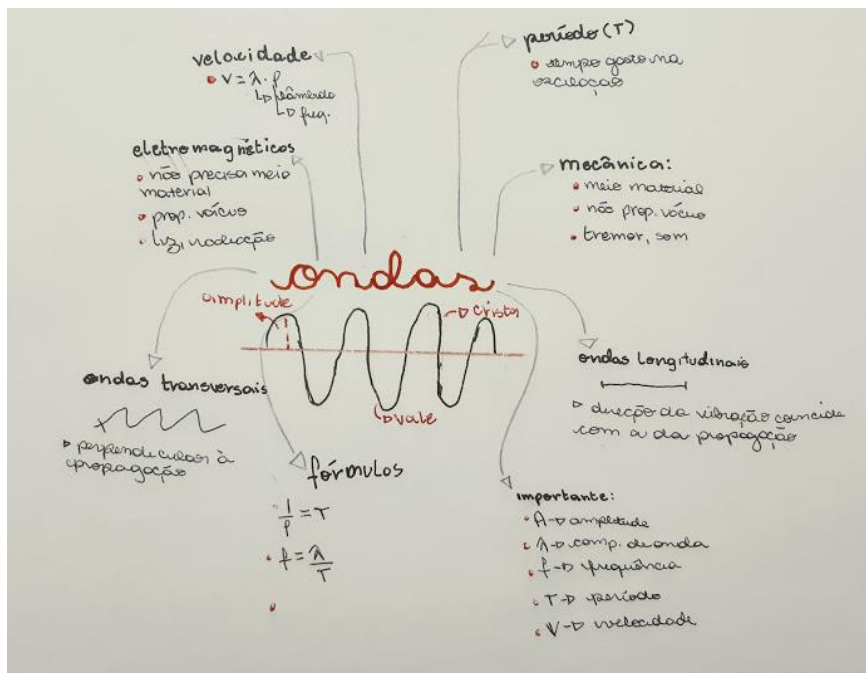
Fotografia 3: Mapa conceitual II



Fonte: Aluno 2

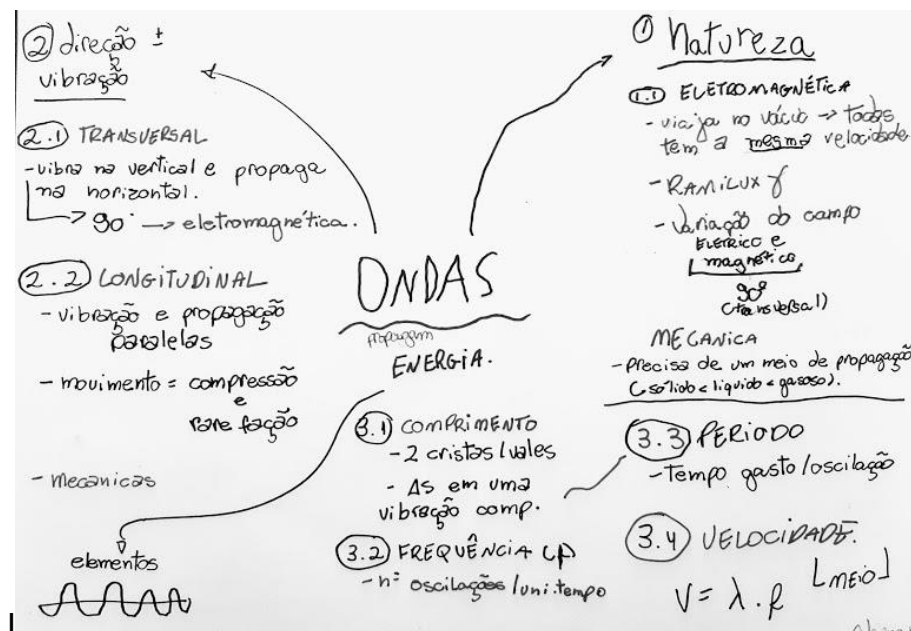
Mas observamos que alguns mapas eram repletos de subsunções e acima do esperado, conforme os mapas a seguir:

Fotografia 4: Mapa conceitual IV



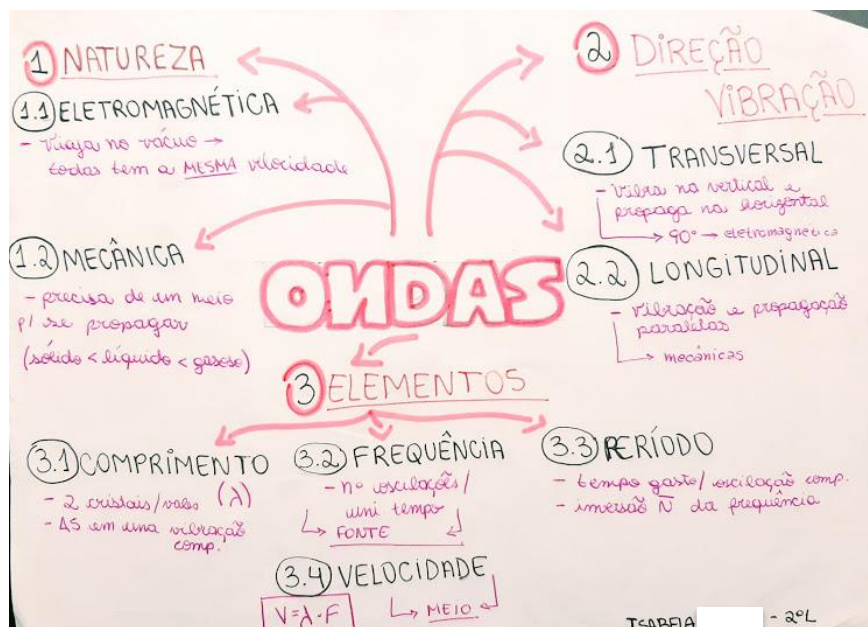
Fonte: Aluno 3

Fotografia 5: Mapa conceitual V



Fonte: Aluno 4

Fotografia 6: Mapa conceitual VI



Fonte: Aluno 5

Após a análise observamos que o resultado inicial estava acima do esperado.

Na segunda aula, fizemos cinco perguntas aos alunos:

- Como as ondas podem ser geradas?
- Como uma onda se propaga?
- Onde se percebe as ondas no seu dia a dia?
- As ondas são todas iguais?
- Quais os diferentes tipos de ondas?

Após as respostas por escrito, os alunos participaram de uma conversa sobre os questionamentos. Observamos que os alunos ficam mais à vontade depois que alguns colegas respondem ou comentam algo. Depois de algum tempo, todos queriam emitir suas opiniões e comentar algo que foi dito. Neste momento foi possível verificar que mesmo com um conhecimento relativamente bom, os alunos ainda apresentavam algumas dificuldades em organizar de forma clara as suas ideias.

Ao analisar as respostas escritas, verificamos que a quarta pergunta ficou muito vaga e possibilitou uma resposta simples de “sim” ou “não” dificultando uma melhor análise dos conhecimentos pré existentes. Alguns alunos foram muito simplistas em suas respostas demonstrando conhecimento de estrutura mas pouca relação situações problemas e conceitos. Isso pode ser observado nas respostas dos alunos A, B e C:

Aluno A

- a) Por estímulos externos
- b) propagam-se somente em uma direção do espaço: transversal, longitudinal,, em círculo, esfera
- c) não conseguimos ver, as existem ondas eletromagnéticas no nosso cotidiano (tv, rádio, microondas)
- d) sim
- e) podem ser classificadas quanto a sua natureza, quanto a sua forma e quanto a sua direção de propagação

Aluno B

- a) por estímulos externos
- b) por meio de vibrações que se colidem
- c) tv, microondas, rádio
- d) podem ser mecânicas ou eletromagnéticas
- e) mecânicas ou eletromagnéticas

Aluno C

- a) pode ser gerada por influência de terceiros
- b) se propaga por transporte de energia
- c) na estação de rádio
- d) não
- e) mecânica, eletromagnética e gravitacional

Foi observado também, que outro grupo de alunos, conseguiram melhores respostas, mais próximas das esperadas, como se observa nas respostas dos alunos D, E, F e G, sendo que alguns já chegaram a incluir as ondas gravitacionais como um tipo de onda.

Aluno D

- a) A maioria das ondas se formam a partir do sopro do vento na superfície do mar
- b) Propagam-se somente em uma direção do espaço
- c) Nos rádios, tvs, raio x, nos fornos de micro-ondas, etc.

- d) Não
- e) Mecânica, eletromagnética e gravitacional

Aluno E

- a) ondas se propagam pelo mar, objetos eletrônicos, som e etc.
- b) podem se propagar por vibração das mesmas que ocorrem (exemplo da água) através de asteróides atravessando a camada atmosférica e outros fenômenos naturais de influencia como o terremoto que gera o tsunami.
- c) microondas, televisão, celular, cores externas de utensílios ou seres vivos e outros.
- d) não
- e) gravitacionais, mecânicas e eletromagnéticas.

Aluno F

- a) ondas mecânicas são geradas através da vibração dos materiais, como as cordas do violão.
- b) ondas mecânicas como as sonoras, se propagam através das moléculas de oxigênio do ar, já as ondas eletromagnéticas podem se propagar no vácuo, não precisam de átomo.
- c) ver raios solares é um forma de perceber ondas eletromagnéticas.
- d) não
- e) mecânicas, eletromagnéticas e gravitacionais.

As respostas apresentadas foram feitas no segundo encontro, após a leitura do texto “‘Science’ elege ondas gravitacionais como a descoberta do ano” e pesquisarem em casa sobre a detecção das ondas gravitacionais, alguns alunos já foram capazes de incluir as ondas gravitacionais nos tipos de ondas, mas ainda existem dificuldades na compreensão de como as ondas são originadas e se propagam.

Com a falta de um laboratório de física, o uso dos simuladores do Phet deixa os alunos mais próximos dos fenômenos a serem observados. A simulação é semelhante a uma corda no chão com ondas transversais sendo geradas e propagadas sem efeitos gravitacionais ou fricção externa. Os alunos puderam criar suas próprias ondas ou deixaram o trabalho para o oscilador do aplicativo, puderam visualizar a corda vibrar em câmera lenta, alteraram o final da corda e exploraram a mudança de frequência e amplitude do oscilador. Observamos que os estudantes ficaram muito envolvidos

observando o que ocorria com a mudança na amplitude do pulso, a duração do pulso, quando controlavam o amortecimento ou fricção do pulso e com a “tensão” da corda, ou seja, o controle do quanto a corda ficava esticada.

A liberdade de explorarem o aplicativo fez com que eles chegassem mais rapidamente às conclusões que eram pedidas nas atividades com pouca intervenção do professor.

Ao utilizarem o simulador de ondas eletromagnéticas, ficou muito mais fácil a compreensão de como essas ondas são geradas.

Pode-se observar que a utilização dos aplicativos do Phet foi muito benéfica aos alunos pois facilitou a compreensão de como as ondas se propagam, a relação entre frequência e comprimento de onda e a diferença entre ondas mecânicas e eletromagnéticas.

O interesse continuou alto quando se deu início ao estudo das ondas gravitacionais. Por ser um fenômeno muito difícil de ser percebido, os alunos compreenderam a dificuldade para sua detecção. Ficaram surpresos como um evento que ocorre no espaço pode ser observado sem a coleta de luz das estrelas por meio dos telescópios ou lunetas. Um dos alunos questionou: Como pode um observatório astronômico não utilizar a luz ou qualquer radiação eletromagnética emitida pelos astros? Este questionamento abriu portas para boas discussões sobre o assunto elevando o interesse e abrindo portas para o estudo da detecção das ondas gravitacionais. O vídeo “Interferometer Animation” facilitou a explicação de como funciona o interferômetro e como funciona o LIGO. Enquanto o vídeo repetia exaustivamente, o professor foi explicando os eventos/fenômenos que ocorriam e desta forma as perguntas foram aparecendo e após todas as explicações feitas, observamos que os alunos conseguiram absorver bem o funcionamento do interferômetro.

Os alunos apresentaram também muito interesse nos buracos negros, provavelmente devido ao filme Interestelar que trabalha muito a física moderna, falando sobre tempo-espaço, horizonte de eventos, dilatação do tempo, entre outros.

Na avaliação final, ao construir o quadro de comparação entre as ondas eletromagnéticas e as ondas gravitacionais, os alunos construíram o quadro comparativo, com pouca interferência do professor, de forma muito organizada.

Gravitacional	Eletromagnética
Gravidade é uma força fraca e depende da massa	O eletromagnetismo é uma força muito maior, e depende das cargas positivas e negativas.
As ondas gravitacionais são geradas pela aceleração de grandes massas	As ondas eletromagnéticas são geradas por pequenos movimentos de pares de carga
os comprimentos de ondas são maiores que os objetos que a geram.	Pode apresentar comprimentos de onda muito menores que os próprios objetos.
Por terem interações fracas, as ondas gravitacionais são difíceis de detectar	Interagem fortemente com a matéria, sendo assim, fáceis de serem detectadas
Podem viajar sem obstáculos passando por qualquer corpo.	Podem ser absorvidas ou espalhadas por interferência do meio ou de materiais que se encontram no caminho desta onda
Frequência baixa na faixa de onda sonora	Alcance de frequência: espectro das OE

No quadro de comparação construído percebe-se que os alunos, de forma geral, conseguiram apresentar um aprendizado realmente significativo. No quadro verifica-se a atenção que os alunos tiveram em mostrar a as ondas gravitacionais devem ser geradas por grandes massas para serem detectadas, seus comprimentos de ondas grandes e frequências pequenas e a falta de obstáculos em sua propagação.

Na segunda atividade aplicamos quatro questões aos alunos, para serem respondidas individualmente em uma folha de papel que foram entregues ao professor com o objetivo de verificar indícios de um aprendizado significativo.

- a) O que são ondas gravitacionais?
- b) Como uma onda gravitacional é gerada?
- c) Como uma onda gravitacional pode ser detectada?
- d) Para você, qual a importância da comprovação da existência das ondas gravitacionais?

Novamente foi possível verificar um aprendizado realmente significativo. Os alunos apresentaram respostas melhor estruturas e dentro do que era esperado, conforme segue:

Aluno A

- a) São ondas que se propagam no universo.
- b) Através de uma explosão.
- c) Num laboratório americano chamado LIGO.
- d) As teorias de Einstein estavam certas.

Aluno B

- a) São ondas que se propagam no espaço deformando o espaço tempo.
- b) Podem ser geradas por junção de dois buracos negros ou por uma explosão de uma estrela.
- c) Pode ser detectada num laboratório que funciona igual a um interferômetro.
- d) Poder detectar buracos negros que não são visíveis.

Aluno C

- a) São ondas devido a gravidade de grandes estrelas
- b) Quando duas estrelas ou buracos negros giram um ao redor do outro até se unirem emitindo energia.
- c) É detectada no LIGO, em dois tubos muito compridos onde um laser é refletido num espelho.
- d) Como “ver” o universo sem luz.

Aluno D

- a) São ondas que se propagam no universo.
- b) através de junção de dois buracos negros ou por estrelas de grande massa.
- c) por aparelhos muito sensíveis em laboratórios de alta tecnologia nos Estados Unidos onde um raio laser é dividido em dois que vão passar por dois tubos compridos de 4km de comprimento.
- d) Outra forma ver objetos no espaço como buracos negros

## 5.2. Avaliação da metodologia adotada

Ao final da sequência didática, já numa conversa informal, os alunos fizeram seus comentários sobre a metodologia adotada. A utilização dos simuladores do Phet, contribuiu para a compreensão e assimilação significativa dos conteúdos de ondas e os conceitos de frequência, comprimento de onda e com as várias tentativas e observações, devido a liberdade de uso do aplicativo, os conceitos foram deixando de serem individualizados e passaram a ser subsunçores. Os simuladores do Phet mantêm a atenção e envolvem os alunos como se fosse um jogo pois permite que o aluno aprenda pela exploração e descoberta dos conceitos e descrições dos eventos estudados. Quando usamos a tecnologia na educação, na sala aula, mostramos que essa tecnologia não deve ser usada apenas para participar das redes sociais, mas como importante ferramenta para melhor compreensão de alguns conceitos relacionados à matéria estudada. Além de toda participação colaborativa que os alunos tiveram nas atividades, muitos relataram o uso do aplicativo em casa. Isso demonstra que os simuladores usados interagiram de forma relevante com os conceitos aprendidos. De forma unânime, os alunos disseram que a forma com que os assuntos foram apresentados e tratados acabou sendo fundamental para melhor compreensão. O uso de simuladores leva o aluno a estar mais próximo do que se aprende, e seus questionamentos e respostas são muito mais rápidos. Em muitos casos os próprios colegas já respondiam, fazendo com que novos questionamentos surgissem. Os principais comentários foram:

- “foi daora estudar assim.”
- “na próxima vez, chama a gente de novo.”
- “aprendi um monte de coisa que nunca ouvi falar.”
- “poderia ser assim em todas as aulas, aprenderia muito mais.”

A maioria dos alunos pediu para marcar uma data para que pudessem assistir ao filme Interestelar e após o filme, fazer um bate papo para trocar ideias sobre o assunto estudado e o filme.

## CONCLUSÃO

A proposta visa a construção de uma metodologia diferenciada através do uso do simulador virtual gratuito PhET, que tenha mais significado para os estudantes, que estimule sua participação ativa no processo de aprendizagem e possibilite a aquisição de novos conceitos

A sequência didática elaborada neste trabalho, foi pensada numa metodologia diferenciada, através de simuladores do Phet e vídeos, permitindo ao aluno o despertar do interesse pela física moderna e um pouco de astronomia pois desenvolve uma abordagem diferente do que está acostumado. Podemos dizer que ensino passa a ter mais significado e o aluno, mais estimulado com sua participação ativa no processo de aprendizagem, acaba despertando seu interesse em aprender novos conceitos e perceber que a Física não está somente na sala de aula, mas no mundo que ele vive, visível e no invisível.

Em todo trabalho pedagógico observa-se uma preocupação intensa com que o aluno detenha de forma eficaz seu aprendizado. O estudante não pode ser um mero espectador de uma aula expositiva, pois possivelmente assim será menor seu aprendizado. Poderá ocorrer memorização de informações, mas que possivelmente terão curto prazo. Metodologias são criadas para que favoreçam e estimulem o protagonismo dos alunos, pois quanto mais envolvimento ele tem no processo, maior será o seu aproveitamento.

Seguindo as orientações de Ausubel, a sequência didática tem início pela verificação dos conhecimentos prévios do aluno. Assim, se o aluno apresenta subsunçores já existentes em sua estrutura cognitiva, com um material potencialmente significativo e a disposição em aprender, então, pode-se ter uma aprendizagem significativa.

Com essa sequência didática foi possível observar que, com dedicação, planejamento e vontade, o professor pode tornar-se um articulador em sala de aula, entre o conhecimento e o estudante, coordenando atividades, orientando e incentivando para a busca do conhecimento. Basta que o professor organize etapas de acordo com os objetivos que deseja alcançar. Prepare atividades progressivas e articuladas entre si, planejadas para ensinar um conteúdo, etapa por etapa, desde a motivação até a avaliação.

Pelos comentários dos alunos podemos dizer que a proposta de sequência didática fez com que a curiosidade dos alunos fosse despertada e, pelos resultados, em sua maioria, foi possível verificar uma melhora significativa nos conceitos quando comparados ao inicial e os alunos compreenderam as relações entre as ondas, o que são ondas gravitacionais e sua importância.

## REFERÊNCIA

ACEVEDO, Ornella, MORAIS, Eduardo, PIMENTEL, Bruno. O Princípio de Equivalência, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, 2019

ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA. **Movimento dos Planetas**. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/p1/p1.htm>. Acesso em: 13 mar. 2020.

BASE NACIONAL COMUM CURRICULAR. **Educação é a base**. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/>. Acesso em: 21 jan. 2020.

BERNSTEIN, Jeremy. **As ideias de Einstein**. São Paulo: Editora Cultrix. 1975.

CARVALHO, Anna Maria Pessoa de; SASSERON, Lúcia Helena. **Ensino e aprendizagem de Física no Ensino Médio e a formação de professores**. Estudos Avançados. vol.32 no.94 São Paulo. Set./dez. 2018.

CHESMAN, Carlos; ANDRÉ, Carlos; MACEDO, Augusto. **Física Moderna: experimental e aplicada**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física- 2004.

CREF. **Aristarco e as possíveis origens de seu heliocentrismo**. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=aristarco-e-as-possiveis-origens-de-seu-heliocentrismo>. Acesso em: 3 abr. 2020.

DOCPLAYER. **Yves Chevallard e o conceito de transposição didática**. Disponível em: <https://docplayer.com.br/14961477-3-yves-chevallard-e-o-conceito-de-transposicao-didatica.html>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FALCIANO, Felipe Tovar. Geometria, espaço-tempo e gravitação: conexão entre conceitos da relatividade geral. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, ano out/dez 2009, v. 31, n. 4. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172009000400010](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172009000400010). Acesso em: 14 nov. 2020.

FÍSICA.UFMG. **O encurvamento da luz segundo Soldner**. Disponível em: <http://lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/sobral/soldner.htm#:~:text=%E2%80%9CA%20deflex%C3%A3o%20gravitacional%20da%20luz,de%20Johann%20Georg%20von%20Soldner>. Acesso em: 18 set. 2020.

KENNEFICK, Daniel. **Travelling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves**. 1. ed. New Jersey: Princeton University Press. 2006.

LENZI, César Henrique; POMPEIA, Pedro José; STUDART, Nelson. A deflexão gravitacional da luz: De Newton a Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, ed. 1, 13 dez. 2019. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172019000500208&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000500208&tlng=pt). Acesso em: 14 nov. 2020.

LEMONS, E. S. (Re)situando a Teoria de Aprendizagem Significativa na prática docente, na formação de professores e nas investigações educativas. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v.5, n. 3, p. 41, 2005.

LOPES, M.H.O. **A retrogração dos planetas e suas explicações: Os Orbes dos planetas e seus movimentos, da Antiguidade a Copérnico**. Dissertação 2011. 245p. PUC-SP.

MATSUURA, Oscar T. **TIMEU: a Cosmologia de Platão**. 1. ed. São Paulo: Edição do autor, 2019. p. 74.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **LEI Nº 9.394 de 20 de dezembro de 1996**. Disponível em: [http://portal.mec.gov.br/seesp/arquivos/pdf/lei9394\\_ldbn1.pdf](http://portal.mec.gov.br/seesp/arquivos/pdf/lei9394_ldbn1.pdf). Acesso em: 21 jan. 2020.

MOREIRA, M.A. e Masini, E.A.F. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Editora Moraes, 1982

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa**. Primeira Edição. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1999b.

MOREIRA, M.A. **Metodologias de Pesquisa em Ensino**. 1. ed. Porto Alegre: Livraria da Física, 2011a.

MOREIRA, M.A. **UNIDADES DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS – UEPS\***. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2021.

NEWTON, I. **Óptica**. tradução: ASSIS, André Koch Torres, São Paulo: Edusp, 2002.

NOVAK, J. D. e GOWIN, D. B. **Aprender a aprender**. Lisboa, Plátano Edições Técnicas, 1996.

OLIVEIRA, Ivan Santos. **Física Moderna: para iniciados, interessados e aficionados**. São Paulo: Livraria da Física. 2005. v. 1

OLIVEIRA, Ivan Santos. **Física Moderna: para iniciados, interessados e aficionados**. São Paulo: Livraria da Física. 2005. v. 2

PILLING, Diana Paula Andrade; DIAS, Penha Maria Cardoso. A hipótese heliocêntrica na Antiguidade. **Revista Brasileira de Física**, São Paulo, v. 29, ed. 9, p. 613-623, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v29n4/a21v29n4.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2020.

SILVEIRA, Patrick da Rosa. **Estrelas de nêutrons como fontes de ondas gravitacionais e a detecção do modo fundamental**. 2012. 117. Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

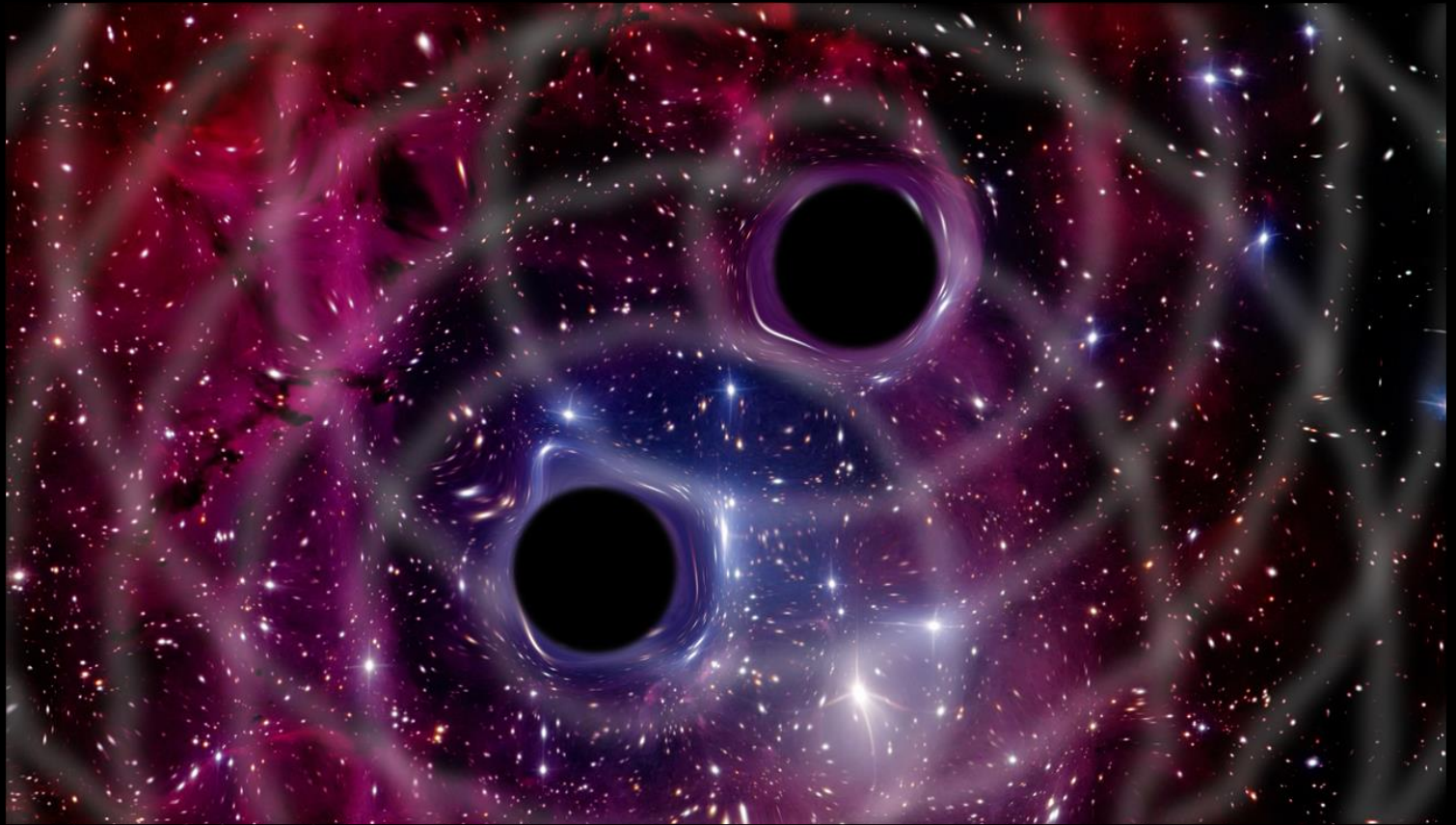
SOARES, Domingos. **O encurvamento da luz segundo Soldner**. [S. l.], 3 nov. 2014. Disponível em: <http://lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/sobral/soldner.htm>. Acesso em: 14 nov. 2020.

TAVARES, Romero. **Construindo mapas conceituais**. Ciênc. cogn. vol.12. Rio de Janeiro nov. 2007. Disponível em: [http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-58212007000300008](http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-58212007000300008). Acesso em 20/06/2020.

TAVARES, Romero. **Ambiente colaborativo on-line e a aprendizagem significativa de Física** 13º CIED - Congresso Internacional ABED de Educação a Distância. Curitiba, 2007.

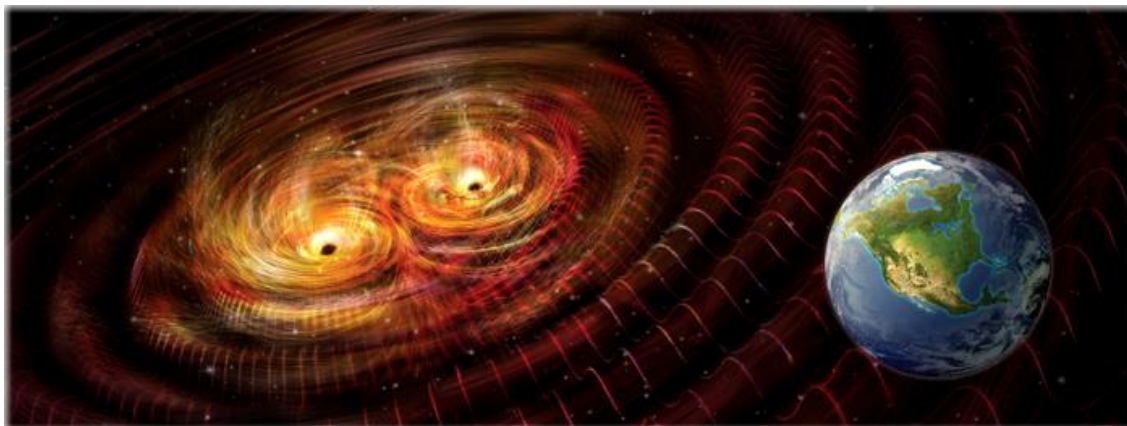
TIPLER, Paul Allen. **Física para cientistas e engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC. 1995. v. 4

VELÁSQUEZ-TORIBIO, Alan Miguel; OLIVEIRA, Marcos Venícios. Primeiro modelo matemático da cosmologia: as esferas concêntricas de Eudoxo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, n. 2, p. 1-12, out./2018. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172019000200702&lng=pt&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000200702&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 23 out. 2020.



# **PROPOSTA DE UEPS PARA ENSINO DE ONDAS GRAVITACIONAIS**

Aluno: Amilcar Costa  
Orientador: Prof. Dr. Manuel Simões



## PROPOSTA DE UEPS PARA ENSINO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

### INTRODUÇÃO

Em 2016, após cento e um anos da Teoria Geral da Relatividade ser anunciada por Einstein, ela foi, mais uma vez, confirmada com a detecção das ondas gravitacionais. Uma das maiores descobertas das últimas décadas, esta descoberta abre mais uma janela para se observar o universo. A detecção das ondas gravitacionais permite “ver” o universo através de “telescópios que percebem a gravidade”. Assim, pode-se entender mais sobre o universo, medir as massas dos buracos negros e saber mais sobre como são formados. Mas para entender como as ondas gravitacionais são geradas, transmitidas e detectadas, é necessário ter conhecimento do conceito de onda, quais os tipos de ondas, como podem ser geradas e transmitidas, quais fenômenos ocorrem com as ondas entre outros pontos importantes de seu estudo.

Assim, a sequência didática apresentada por meio de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (proposta por Marco Antônio Moreira e baseada na Teoria da Aprendizagem de Ausubel), tem como objetivo ensinar de forma significativa Ondas Gravitacionais no ensino médio. É importante que o aluno compreenda que as Ondas Gravitacionais são um novo tipo de ondas.

Nesta pesquisa optou-se por uma metodologia que envolvesse muita interação usando vídeos e simuladores criando dinamismo e evidências de aprendizagem significativa. Seguiremos alguns passos:

- Situação inicial: vamos propor situações de ensino para que seja feito um levantamento amplo dos conhecimentos prévios dos alunos.
- Situações-problema: algumas questões são feitas para discussão em grande grupo.
- Aprofundamento dos conhecimentos: faremos atividades através de simuladores e apresentação de vídeos sobre geração e propagação de ondas e assim, trabalhar novos conteúdos.
- Nível mais alto de complexidade: após uma revisão do que foi visto, teremos novas atividades estabelecendo novas relações no estudo de ondas.
- Avaliação: Como diz Moreira (2011) “a avaliação da aprendizagem deve ser feita ao longo de sua implementação, assim, pode-se, antes de cada aula, efetuar ajustes na programação para melhor ancoragem dos conhecimentos”. As avaliações devem ser divididas em avaliação individual, avaliação da UEPS como instrumento de aprendizagem significativa e a avaliação da UEPS pelo professor.

## **OBJETIVO**

Compreender de forma significativa Ondas Gravitacionais fazendo analogias com as ondas já conhecidas, ressaltando a nova janela que se abre para a exploração dos Cosmos. O foco é o Ensino Médio, mas não se restringe apenas a este nível de ensino.

## METODOLOGIA DE ENSINO

### AULA 1 - TEMA: O QUE JÁ SABEMOS?

#### Objetivo específico:

Verificar o conhecimento dos alunos sobre ondas;

#### Conteúdos:

Texto “Science’ elege ondas gravitacionais como a descoberta do ano”.

#### Atividade 1: Comprovação da onda gravitacional

<b>Tempo:</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	interativo/ dialógico
<b>Propósito:</b>	Apresentar a comprovação da existência das ondas gravitacionais
<b>Material de apoio:</b>	Texto “Science’ elege ondas gravitacionais como a descoberta do ano”.

#### Descrição:

Nesta primeira aula, os alunos vão receber o texto “Science’ elege ondas gravitacionais como a descoberta do ano” e após leitura individual serão incentivados a elaborar um mapa mental sobre ondas. Para isso os alunos formarão grupos de três componentes para realizar essa atividade e será sugerido que esse trio se mantenha em todas as atividades que serão propostas para que seja possível fazer as análises e acompanhamento de aprendizagem.

#### Mapa Mental

O “Mapa mental” também conhecido como memograma é uma ferramenta útil para os alunos no momento de focar nos estudos. É um resumo de informações em uma organização de ideias por meio de palavras-chave, não exigindo uma organização hierárquica. No mapa mental a ideia principal (conceito chave) é ligada a outras ideias ou conceitos por meio de um contexto ou associação.

## **'Science' elege ondas gravitacionais como a descoberta do ano**

Folha de São Paulo visto em 28/05/2017

Pequenas ondulações no tecido do espaço-tempo, provocadas pela aceleração de um corpo com massa, foram previstas há um século pelo físico Albert Einstein. Porém, fenômeno só foi confirmado em 2016.

A revista "Science" elegeu na quinta-feira (22) a observação das ondas gravitacionais como a descoberta mais importante de 2016. O fenômeno foi comprovado pelo grupo de pesquisadores do Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) e representa o início de uma nova era para a astronomia.

"Foi uma eleição bem fácil. Houve muitos avanços importantes neste ano, mas a observação das ondas gravitacionais confirma uma teoria centenária do próprio Albert Einstein", afirmou Adrian Cho, da Science.

As ondas gravitacionais são pequenas ondulações provocadas no tecido do espaço-tempo quando um corpo com massa é acelerado. Elas podem ser comparadas às ondas que se formam na água após o arremesso de uma pedra.

Elas foram previstas pelo físico Albert Einstein em 1915, uma parte da sua famosa Teoria da Relatividade, sendo a última grande previsão desta teoria que ainda não havia sido comprovada.

O que são ondas gravitacionais e por que elas são importantes? Cho destacou que a descoberta foi uma "saga científica incrível", pois levou mais de 40 anos para os cientistas que trabalharam neste projeto comprová-la, devido à necessidade de uma tecnologia muito avançada.

A equipe de astrofísicos do Ligo usou dois novos e potentes detectores de 1,1 bilhão de dólares para medir uma onda gravitacional formada pela fusão de dois buracos negros numa galáxia distante 1,3 bilhão de anos-luz da Terra. Um dos detectores está localizado em Livingston, no estado da Luisiana, e o outro em Hanford, Washington.

Além das ondas gravitacionais, a descoberta de um planeta parecido com a Terra, o software que tenta simular a inteligência humana, chamado de AlphaGo, e um estudo genético que determinou que uma onda migratória da África povoou todo o mundo ficaram entre os finalistas da seleção da revista.

<http://www1.folha.uol.com.br/ciencia/2016/12/1843944-science-elege-ondas-gravitacionais-como-a-descoberta-do-ano.shtml>

### Atividade 2: Levantamento dos conhecimentos prévios

<b>Tempo</b>	20 min.
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico.
<b>Propósito</b>	Construção de mapa mental sobre “ondas”.
<b>Material de apoio</b>	Texto “‘Science’ elege ondas gravitacionais como a descoberta do ano”.

#### Descrição:

Os alunos ficarão à vontade para fazer este mapa mental. Os mapas mentais serão entregues ao professor.

### Atividade 3: Tarefa de casa

Para a próxima aula, o professor deve pedir, como atividade em casa, que os alunos pesquisem sobre a divulgação da comprovação das ondas gravitacionais e tragam textos, ou imagens, ou vídeos sobre a observação.

## AULA 2 - TEMA: ONDAS MECÂNICAS

#### Objetivo específico:

Compreender o conceito de ondas.

#### Conteúdos:

Comprimento de onda, período, frequência e velocidade de onda.

### Atividade 1: Discutindo o conceito de onda

<b>Tempo</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Identificar e reconhecer as diferenças entre as grandezas físicas envolvidas no estudo de ondas além de relacionar variáveis relevantes.
<b>Material de apoio</b>	Lousa

#### Descrição:

O professor irá lançar questões/situações aos alunos que deverão ser discutidas em grande grupo, sob a mediação do professor, com a intenção de ouvir a opinião do grupo, estimular a curiosidade sobre o assunto, sem a necessidade de chegar a uma resposta final.

- a) como as ondas podem ser geradas?
- b) como uma onda se propaga?
- c) onde se percebe ondas no seu dia a dia?
- d) as ondas são todas iguais? Se não, quais as diferenças?
- e) quais os diferentes tipos de ondas?

### Atividade 2: Entendendo a formação e propagação da onda mecânica.

<b>Tempo</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Manipulando um simulador do Phet, o aluno deve observar e identificar as mudanças na formação das ondas quando se altera a amplitude, período e velocidade da fonte de ondas.
<b>Material de apoio</b>	Computador e simulador do Phet

No laboratório de informática do colégio, inicie a aula explicando como o simulador [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-on-a-string](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string)

deve ser usado e quais os principais comandos do simulador para que os alunos possam verificar como as ondas podem ser formadas, como elas se propagam e observem como ocorrem as reflexão de ondas. Com liberdade poderão usar todos os recursos do simulador e devem anotar os resultados obtidos no experimento para discussão na próxima aula. O professor, porém, poderá orientar os alunos quanto a algumas observações sugeridas no quadro abaixo.

PhET é um projeto da Universidade do Colorado que oferece simulações de matemática e ciências. As simulações são testadas e avaliadas para assegurar a eficácia educacional. Estes testes incluem entrevistas de estudantes e observação do uso de simulação em salas de aula. As simulações podem ser executadas on-line ou copiadas para o computador. Todas as simulações são de código aberto e livres para todos os estudantes e professores.

### Como usar o simulador

Com este simulador, os alunos poderão explorar a formação de ondas em uma corda. Eles poderão:

- criar a onda ou usar um oscilador que gerará ondas;
- visualizar a corda vibrar em câmera lenta;
- alterar a extremidade final da corda e explorar a reflexão da onda além;
- ajustar a frequência e a amplitude do oscilador;
- modificar a absorção de energia (fricção) que ocorre na propagação da onda;
- ajustar a tensão na corda.

A simulação é como uma corda no chão com ondas transversais sendo geradas e propagadas sem efeitos gravitacionais ou fricção externa.

A corda é modelada usando partículas e pode parecer que a corda se desfez quando condições extremas forem definidas (grande comprimento de onda, amplitude e tensão).

Neste aplicativo, os estudantes ficam muito envolvidos e aprendem com o simulador com pouca orientação.

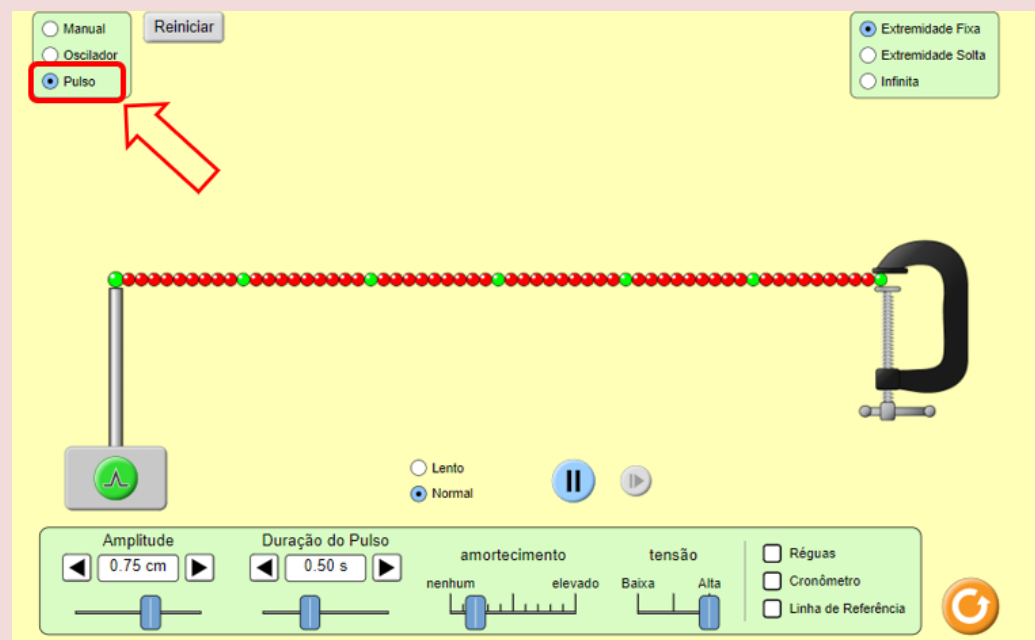
Dicas para controles:

Usando o “pulso”:

Em “amplitude” você pode alterar a amplitude do pulso.

Em “duração do pulso” você controla o período da onda e conseqüentemente o comprimento do pulso.

**Figura 1:** Aplicativo Phet - ondas na corda



Fonte: <https://www.phet.colorado.edu/>

Em “amortecimento” você controla o amortecimento ou fricção do pulso.

Em “tensão” você controla o quanto a corda fica esticada.

#### Primeira atividade

Para iniciar, peça para que os alunos retirem todo o amortecimento da corda, deixem com tensão média e criem ondas clicando em “Pulso”. Eles devem verificar o que acontece quando a amplitude é alterada, mantendo o comprimento do pulso e depois verificar quando o comprimento do pulso é alterado mantendo a amplitude.

Após isso, eles devem verificar o que ocorre quando a tensão é diminuída e depois quando a tensão é aumentada.

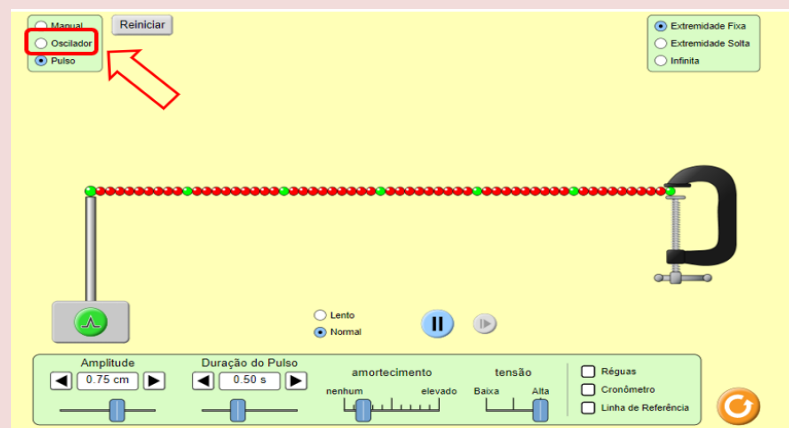
#### Segunda atividade

Agora os alunos irão alterar a extremidade da corda, passando de “extremidade fixa” para “extremidade solta” ou vice-versa. Após esta atividade o professor deve fazer um diálogo com os alunos questionando o que aconteceu e o porquê deste acontecimento.

#### Terceira atividade

Os alunos vão alterar a forma com que a onda é criada. Eles mudarão para o “oscilador”.

**Figura 2:** Aplicativo Phet - ondas na corda 2

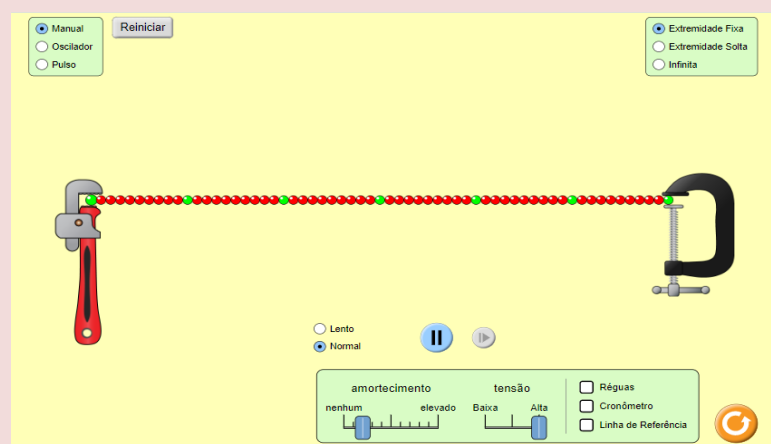


Fonte: <https://www.phet.colorado.edu/>

Repita as operações das atividades anteriores e peça para que os alunos observem atentamente que ocorre com a corda após a reflexão do pulso com a extremidade fixa. O professor deve falar sobre as ondas estacionárias que se formaram.

Após isso, deixe os alunos explorarem o aplicativo e sugira que eles utilizem o modo manual, onde ele deve, sobre a “chave”, com o mouse clicar e mantê-lo clicado e executar o movimento com o mouse que será o movimento da chave criando a onda.

**Figura 3:** Aplicativo Phet - ondas na corda 3



Fonte: <https://www.phet.colorado.edu/>

Algumas questões que poderão ser utilizadas na atividade:

- explique o padrão de uma onda refletida de uma extremidade fixa ou solta.
- desenvolva um método para determinar a velocidade da onda.

- desenhe uma experiência para encontrar a relação entre a velocidade da onda, comprimento de onda e frequência.
- meça a velocidade da onda e em diferentes níveis de tensão para determinar a relação entre velocidade e tensão.
- verifique como duas ondas interferem.
- qual efeito o amortecimento tem em uma onda?

Caso a escola não ofereça um laboratório de informática, uma opção seria o aluno usar seu smartphone.

Para turmas do ensino fundamental, sugiro iniciar com o aplicativo do Phet:

[https://phet.colorado.edu/sims/html/waves-intro/latest/waves-intro\\_pt\\_BR.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/waves-intro/latest/waves-intro_pt_BR.html)

### Atividade 3: Tarefa de casa

#### Descrição:

Ao final da aula o professor deverá propor como atividade de casa que os alunos assistam aos vídeos “Ondas Eletromagnéticas - parte 1” no link: [https://www.youtube.com/watch?v=t6fOIQimm\\_Y](https://www.youtube.com/watch?v=t6fOIQimm_Y). Neste vídeo encontramos uma explicação sobre as ondas eletromagnéticas, as diferentes frequências no espectro eletromagnético e sua propagação no vácuo. Após o minuto 5 do vídeo, temos a explicação das ondas de rádio e micro-ondas, o uso em GPS e a aplicação na observação dos componentes de poeira cósmica ou supernovas e até para investigação da origem do universo.

O vídeo deve ser assistido até o minuto 5:00. Caso o aluno queira assistir todo o vídeo, não tem problema, mas ele deve assistir no mínimo os cinco minutos iniciais.

O segundo vídeo é o “O que é que provoca as ondas?” que se encontra no link: [https://www.youtube.com/watch?v=ECyHjz6uM\\_o](https://www.youtube.com/watch?v=ECyHjz6uM_o) o vídeo pode ser assistido inteiro. O vídeo fala-se sobre a formação das ondas do mar e tsunamis.

## AULA 3 - TEMA: ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

### Objetivo específico:

Compreender como as ondas eletromagnéticas são geradas

Identificar as diversas ondas eletromagnéticas devido a diferentes frequências.

**Conteúdos:** Ondas eletromagnéticas, frequência, comprimento de onda, propagação.

### Atividade 1: Conhecendo as ondas eletromagnéticas

<b>Tempo</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Reconhecer as diversas ondas eletromagnéticas devido a mudanças de frequência.
<b>Material de apoio</b>	Lousa, computador e projetor.

### Descrição:

Ao começar a aula, o professor questionará sobre o vídeo “Ondas Eletromagnéticas - parte 1” deixado como atividade de casa e discutirá pontos importantes do que foi visto como:

- Quais os principais tipos de ondas eletromagnéticas?
- O que eles possuem de igualdade?
- Quais as ondas eletromagnéticas que mais estão relacionadas com nosso cotidiano e o que diferenciam elas?

## Atividade 2: Conhecendo as ondas eletromagnéticas

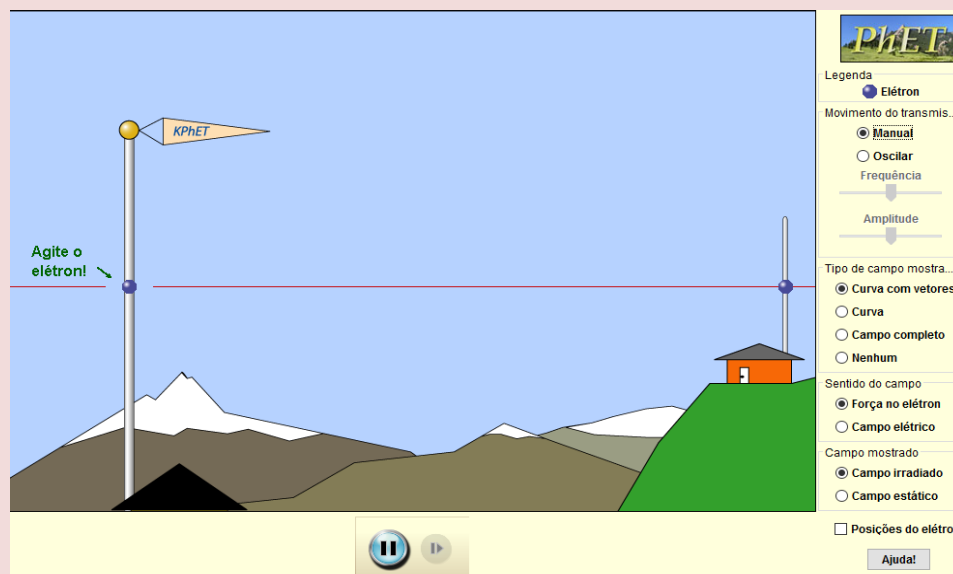
<b>Tempo</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Identificar ondas eletromagnéticas Prever e avaliar situações cotidianas que envolvam ondas eletromagnéticas.
<b>Material de apoio</b>	Computador

### Descrição:

O professor deve apresentar as ondas eletromagnéticas e na sequência os alunos irão utilizar o simulador [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/legacy/radio-waves](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/radio-waves) no qual a partir do movimento dos elétrons obterá ondas eletromagnéticas. Veja uma sugestão de como utilizar o simulador.

### Aplicativo de Ondas de Rádio

**Figura 4:** Aplicativo Phet - ondas de rádio



Fonte: <https://www.phet.colorado.edu/>

O aplicativo apresenta as ondas de rádio emitidas pela antena de uma rádio. Ao mexer o elétron transmissor manualmente ou com o oscilador automaticamente é possível verificar o campo como uma curva ou vetores.

O gráfico mostra as posições do elétron no transmissor e no receptor.

Como este aplicativo possui alguns comandos parecidos com o que já foi usado em outra aula no aplicativo de ondas na corda, o professor deve deixar os alunos explorarem o aplicativo.

Após um tempo de exploração o professor deve encaminhar a aula com questionamentos:

- Ao alterar a amplitude o que ocorre com o comprimento da onda? E com a velocidade da onda?
- Ao alterar a frequência o que ocorre com o comprimento da onda? E com a velocidade?
- Ao colocar o campo mostrado em “campo estático”, o que é observado em relação ao campo elétrico criado pelo elétron?
- Porque a oscilação da onda é oposta ao campo elétrico?

Estas são algumas indagações que poderão ser usadas em aula. Estimule as perguntas dos alunos e comentários a respeito do assunto.

## AULA 4 - TEMA: ONDAS GRAVITACIONAIS

### **Objetivo específico:**

Compreender a gravidade pela deformação espaço-tempo

### **Conteúdos:**

Ondas que transmitem energia por meio de deformações no espaço-tempo.

Teoria da Relatividade Geral.

### Atividade 1: Gravidade - deformação espaço tempo

<b>Tempo</b>	30 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Observar e reconhecer causas da variação de movimentos associadas à deformação espaço tempo.
<b>material de apoio</b>	Tecido elástico, esferas ou bolinhas de gude.

#### Descrição:

A aula começará com uma atividade prática. Os alunos deverão construir juntamente com o professor uma analogia do “tecido espaço-tempo”, através de uma representação bidimensional. Este modelo é útil para a visualização do espaço-tempo em 2D imersa no espaço 3D e descrever como o espaço-tempo interage com a matéria ao longo do universo. Para este modelo deve ser usado um lençol, uma esfera ou pedra de ao menos 1 kg e algumas bolinhas de vidro. Neste momento sugiro que o professor explore o modelo, explicando as diferenças entre o conceito de gravidade de Newton de Einstein, como ondas gravitacionais podem ser geradas e como seria a deformação do tempo-espaço no caso de buracos negros.

O vídeo “Gravity Visualized” a seguir é um modelo da atividade e orientação de como o professor deve seguir em suas explicações.

<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1Kje0yLg&t=29s>

#### Gravidade visualizada

Apesar das origens das ondas gravitacionais serem extremamente violentas, quando as ondas atingem a Terra são milhões de vezes menores e menos perturbadoras. Isto devido à grande distância entre o local que ocorre a perturbação e a Terra, e que ao se propagar tem sua intensidade muito reduzida.

Conhecida por muitos, compreendida por poucos, a teoria da relatividade geral proposta por Albert Einstein em 1915 tenta descrever como o espaço-tempo interage com a matéria ao longo do universo.

Na época, esta teoria tinha grande dificuldade de ser testada, mas uma das formas, foi a observação durante o eclipse total do Sol de 1919<sup>1</sup>.

Imagine então a dificuldade de aceitar a ideia da formação de ondulações propagando-se no tecido espaço-temporal.

Enfim, após cem anos, cientistas anunciam ter detectado ondas gravitacionais, comprovando a teoria da relatividade geral. Para Einstein, distorções no campo gravitacional do universo transportam energia pelo espaço, chamando este fenômeno de ondas gravitacionais<sup>1</sup>.

As ondas detectadas pelos cientistas devem ser provenientes da interação entre dois buracos negros, um com 36 vezes a massa do Sol e o outro com 29 vezes a massa solar, estimam os cientistas após eles terem girado velozmente um ao redor do outro e acabaram colidindo, dando origem a um único buraco negro<sup>1</sup>.

## AULA 5 - A DETECÇÃO DAS ONDAS GRAVITACIONAIS

### **Objetivo específico:**

Compreender como funciona um interferômetro.

Relacionar o funcionamento do interferômetro com o Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO)

### **Conteúdos:**

Interferômetro

Funcionamento do LIGO

---

<sup>13</sup> <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/eclipse.pdf>

<sup>14</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=azZjdqUIXSA>

<https://www.ligo.caltech.edu/detection>

<sup>15</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=XmSLGujB-F4> ,

[https://www.youtube.com/watch?v=s06\\_jRK939I](https://www.youtube.com/watch?v=s06_jRK939I)

<https://www.youtube.com/watch?v=xj6vV3T4ok8>

## Atividade 1: Detectando uma onda gravitacional

<b>Tempo</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Compreender como funciona um interferômetro
<b>Material de apoio</b>	Computador ou projetor multimídia

### Descrição:

Para iniciar esta atividade, os alunos devem assistir os vídeos:

Após o vídeo o professor deve questionar os alunos quanto à compreensão do vídeo. Se necessário for, retome a explicação do funcionamento do interferômetro.

Para iniciar esta atividade, os alunos devem assistir o vídeo “Interferometer Animation” no link <https://www.youtube.com/watch?v=UA1qG7Fjc2A> que é uma simulação do funcionamento de um interferômetro. Após assistirem o vídeo, o professor deve questionar os alunos quanto à compreensão do vídeo. Se necessário, o professor deve fazer nova explicação usando a projeção do vídeo.

### Como as ondas gravitacionais foram detectadas

O LIGO (Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser) é o maior observatório de ondas gravitacionais do mundo. É composto por dois grandes interferômetros laser localizados a 3000 km de distância. Apesar de ser chamado observatório, ele nada lembra os observatórios astronômicos. Primeiramente observa-se que o LIGO é cego, ou seja, não se utiliza da luz ou qualquer radiação eletromagnética emitida pelos astros, pois as ondas gravitacionais não fazem parte do espectro eletromagnético. Em segundo lugar, como não precisa coletar luz das estrelas, não necessita de espelhos para produzir imagens. Ele apenas precisa de dois tubos de vácuo de aço de 4 km de comprimento, de 1,2 m de diâmetro, dispostos em forma de "L" (<https://www.youtube.com/watch?v=RzZgFKolfQI>),

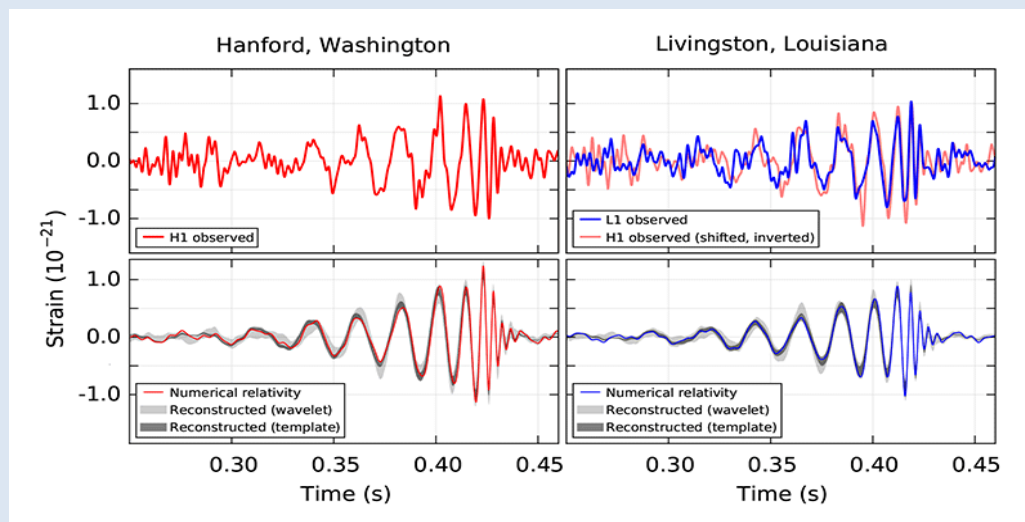
**Fotografia 1:** LIGO Livingston na Louisiana



**Fonte:** <https://www.ligo.caltech.edu/LA/> Acesso em 19/06/2020.

Além disso, o LIGO não pode funcionar sozinho. A única maneira de detectar com certeza uma onda gravitacional é operando em uníssono com um outro observatório distante de modo que as vibrações locais não sejam confundidas com sinais de ondas gravitacionais.

**Gráfico:** Onda gravitacional operando em uníssono nos laboratórios de Livingston e Hanford.



**Fonte:** <https://physics.aps.org/articles/v9/17>

Em 14 de setembro de 2015, sinais semelhantes foram observados em ambos os interferômetros da LIGO. Os painéis superiores mostram o sinal medido nos detectores Hanford (superior esquerdo) e Livingston (topo direito). Os painéis inferiores mostram o sinal esperado produzido pela fusão de dois buracos negros, com base em simulações numéricas (<https://www.youtube.com/watch?v=aEPlwEJmZyE>).

## Histórico do LIGO

O LIGO (Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser – em inglês: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) foi fundado em 1984 como um projeto de Caltech (Instituto de Tecnologia da Califórnia) e o MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts) com o objetivo de detectar de forma direta as ondas gravitacionais contempladas pela Teoria Geral da Relatividade de Einstein.

Os detectores de ondas gravitacionais do LIGO utilizam a interferometria laser para medir as minúsculas ondulações no espaço-tempo devido a passagem de ondas gravitacionais devido a fusões de pares de estrelas de nêutrons ou buracos negros ou supernovas.

O LIGO consiste de dois interferômetros distantes aproximadamente 3000 km nos Estados Unidos - um em Hanford, Washington e outro em Livingston, Louisiana. Este laboratório possui os maiores instrumentos ópticos de precisão e o segundo maior sistema de vácuo do mundo.

A construção do LIGO foi aprovada em 1990 e inaugurado em 1999. As primeiras operações, buscas por ondas gravitacionais, ocorreram em 2002 sem sucesso, mas a partir desta data a sensibilidade do projeto foi melhorada até a instalação avançada do LIGO ficar concluída chegando à sua sensibilidade avançada em 2014.

Em 14 de setembro de 2015, durante um teste de engenharia alguns dias antes do início da primeira pesquisa oficial, o Advanced LIGO detecta ondas gravitacionais fortes devido à colisão de dois buracos negros.

Veja mais em:

[https://www.ligo.caltech.edu/system/media\\_files/binaries/306/original/ligo-press-kit.pdf](https://www.ligo.caltech.edu/system/media_files/binaries/306/original/ligo-press-kit.pdf)

### Atividade 2: Como que funciona o LIGO?

<b>Tempo</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Compreender como funciona o Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser
<b>material de apoio</b>	Computador e projetor.

**Descrição:**

Para explicar o funcionamento do LIGO, o professor pode passar o vídeo “LIGO Gravitational Wave Observatory” disponível no link <https://www.youtube.com/watch?v=RzZgFKolfQI&t=321s> .

É importante o professor colocar a legenda traduzida para o português.

Após a apresentação do vídeo, o professor deve fazer alguns questionamentos, como:

- Qual a necessidade de ter ao menos dois interferômetros bem distantes para a detecção de OG?
- Por que o observatório LIGO é dito “cego”?

**Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser**

O LIGO é formado por quatro instalações distintas nos Estados Unidos: dois detectores de ondas gravitacionais (os interferômetros) e dois centros de pesquisa universitários. Distantes 3000 km os interferômetros estão localizados nos estados de Washington e Louisiana e os centros de pesquisa estão localizados no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), em Pasadena, Califórnia, e no Massachusetts Institute of Technology (MIT), em Cambridge, Massachusetts.

**Fotografia 2:** LIGO de Livingston e Hanford.



**Fonte:** <https://www.ligo.caltech.edu/>

Os interferômetros do LIGO são em sua essência semelhantes aos interferômetros de Michelson, tem a forma de L, tem espelhos nas extremidades dos braços para

refletir a luz e ao combinar os feixes criando um padrão de interferência. Porém, seu tamanho e complexidade vão muito mais além.

Mesmo com braços de 4 km de comprimento existe um sistema de reflexão sucessiva do laser (cerca de 280 vezes) que faz com que o caminho percorrido pela luz até a fusão dos feixes chegue a 1120 km, sendo assim o instrumento mais sensível, podendo medir mudanças no comprimento do braço 1000 vezes menor que um próton.

**Figura 5:** Uma ilustração do detector subterrâneo de ondas gravitacionais KAGRA no Japão.



**Fonte:** ICRR, Univ. de Tóquio.

Quando os interferômetros estão em funcionamento, com a passagem de ondas gravitacionais, o espaço é esticado em uma direção e encurtado em outra perpendicular, assim um braço do interferômetro é alongado e o outro encolhido e vice-versa pelo tempo que a onda passar

Como ocorre mudança no comprimento de cada braço, o percurso do laser é alterado e conseqüentemente ocorrerá padrões de interferência semelhantes na fusão dos feixes divididos nos dois detectores e de forma simultânea. A importância dos padrões idênticos e simultâneos identifica a passagem de ondas gravitacionais pois se ocorrer oscilações devido a terremotos ou tráfego de estradas próximas, os padrões em cada detector serão diferentes e não ocorrerão no mesmo instante.

### Atividade 3: Que fenômeno originou as OG detectadas?

<b>Tempo</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	não interativo/de autoridade
<b>Propósito</b>	Saber quais os principais fenômenos que originam as ondas gravitacionais
<b>Material de apoio</b>	Texto: Origem das ondas gravitacionais

#### Descrição:

O professor deve apresentar as principais origens das ondas gravitacionais, tais como: binários supermaciços de buracos negros, binário de anã branca, binários de buracos negros, binários de estrelas de nêutrons e estrelas de nêutrons.

#### Origem das ondas gravitacionais

As ondas gravitacionais podem ter uma origem estocástica (indeterminada ou por eventos aleatórios), por binários ou explosão. No caso de um fundo estocástico, pode-se pensar em amplas faixas de frequência com muitas fontes, em vez do sinal produzido por uma fonte individual. O próprio Big Bang, pode ser um exemplo. O fundo binário é decorrente de milhares de sistemas binários que emitem ondas gravitacionais. A vantagem é poder saber que a radiação gravitacional é emitida no nível esperado. Estes binários podem ser por estrelas de nêutrons binárias (pulsares), pares de buracos negros supermassivos ou por estrelas anãs brancas binárias. À medida que duas estrelas orbitam umas às outras, elas perdem constantemente energia e momento angular na forma de ondas gravitacionais e isso faz com que a separação orbital encolha lentamente e se fundam após algum tempo. No caso de explosões, estes eventos possuem duração muito limitada que não precisam ter nenhuma periodicidade especial. Um exemplo seria uma supernova de colapso central.

As influências que as fontes exercem nas ondas gravitacionais geradas, estão principalmente na frequência dessas ondas e conseqüentemente nos seus comprimentos de onda.

Assim, temos:

**Binários supermaciços de buracos negros:** Um sistema de buracos negros supermassivos irá fundir, produzindo uma enorme explosão de ondas gravitacionais em frequências de milihertz. Esta explosão pode ser detectada na maior parte do Universo.

**Binário de anã branca:** Existem milhares de sistemas binários de estrelas anãs brancas em nossa galáxia. A interação de um binário de anãs brancas pode dar origem a uma ampla variedade de resultados astrofísicos que variam de supernovas, estrelas de nêutrons e ondas gravitacionais entre outros.

**EMRI (Inspirals Extrema-Mass-Ratio):**

Essas espiralizações geram ondas gravitacionais que esperamos detectar com o futuro detector de ondas gravitacionais baseadas no espaço, LISA.

Um buraco negro central de massa de milhares a milhões de massas solares interage com um outro corpo, podendo ser anãs brancas, estrelas de nêutrons ou buracos negros de massa estelar apenas algumas vezes mais maciças que o nosso Sol) no processo de ser capturado e engolido por um buraco negro supermassivo, o corpo descreve um movimento espiralizado.

**Binários de Buracos Negros:** são sistemas binários formados por dois buracos negros de massa estelar (algumas vezes a massa do Sol).

**Binários de Estrelas de Nêutrons:** são sistemas binários formados por duas estrelas de nêutrons.

**Estrelas de Nêutrons:** são estrelas de nêutrons individuais que devido a uma assimetria de massa na sua superfície, ao girarem criaram ondas gravitacionais.

**Leia e Veja:**

Espaço tempo

<https://www.youtube.com/watch?v=3ugztf7US4>

Gravidade

<https://www.youtube.com/watch?v=l-BVkHRLPfo>

Propagação da luz

<https://www.youtube.com/watch?v=VyzJW6c0rRs>

Fusão de anãs brancas

<https://arxiv.org/abs/1502.05052>

Buraco negro

[http://www.science.tamu.edu/news/story.php?story\\_ID=1597#.WRJsTYjyvlU](http://www.science.tamu.edu/news/story.php?story_ID=1597#.WRJsTYjyvlU)

## AULA 6 - TEMA: AVALIAÇÃO

### Objetivo específico:

Avaliar o conhecimento adquirido

### Atividade 1: Diferenças entre radiação gravitacional e eletromagnética

<b>Tempo</b>	10 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Reconhecer as diferenças entre as ondas gravitacionais e as ondas eletromagnéticas.
<b>Material de apoio</b>	Lousa

### Descrição:

O professor deve dividir o quadro em duas colunas e deixar que os alunos digam quais as principais semelhanças e diferenças entre as ondas eletromagnéticas e as ondas gravitacionais. Após elencar todos os pontos, ele deve verificar com os alunos todos os quesitos pontuando se é correto ou não. As observações presentes na tabela do “Ondas Gravitacionais X Ondas Eletromagnéticas” não devem ser esquecidas.

#### Ondas Gravitacionais x Ondas Eletromagnéticas

Apesar de observarmos muita semelhança entre ondas eletromagnéticas e ondas gravitacionais, elas são bem diferentes.

Pode-se dizer que existem duas principais diferenças entre estas ondas que valem destacar:

- 1- A natureza das ondas e suas consequências.
- 2- A carga gravitacional é equivalente à inércia e carga eletromagnética não.

Assim, temos:

Gravitacional	Eletromagnética
Gravidade é uma força fraca e depende da massa que possui apenas “um sinal”	O eletromagnetismo é uma força muito maior, porém apresenta dois sinais opostos de carga.
Os campos gravitacionais para serem facilmente percebidos são gerados por grande concentração de massa	Os campos eletromagnéticos são causados por rápidas oscilações de carga.
As ondas gravitacionais são geradas pela aceleração de grandes massas e os comprimentos de ondas são maiores que os objetos que a geram.	As ondas eletromagnéticas são geradas por pequenos movimentos de pares de carga e têm comprimentos de onda muito menores que os próprios objetos.
Por terem interações fracas, as ondas gravitacionais são difíceis de detectar	Interagem fortemente com a matéria, sendo assim, fáceis de serem detectadas
Podem viajar sem obstáculos passando por qualquer corpo. O universo é praticamente transparente.	Interagem fortemente com a matéria e pode ser absorvida ou espalhada por interferência do meio ou de materiais que se encontram no caminho desta onda
Alcance de frequência: sonora	Alcance de frequência: espectro das OE
Pode-se dizer que o universo pode ser visto com ondas EM e ouvido com OG	

## Atividade 2: Avaliação individual

<b>Tempo</b>	10 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo/ dialógico
<b>Propósito</b>	Diagnosticar a situação de aprendizagem de cada aluno.
<b>Material de apoio</b>	Folhas de respostas

**Descrição:**

Será realizada uma avaliação individual através de questões abertas envolvendo os conceitos-foco da unidade. Neste momento você terá os indícios de que sua sequência didática atingiu seus objetivos. Pode-se aplicar as seguintes questões:

- O que são ondas gravitacionais?
- Como uma onda gravitacional é gerada?
- Como uma onda gravitacional pode ser detectada?
- Para você, qual a importância da comprovação da existência das ondas gravitacionais?

**Atividade 3: Comentários finais e avaliação da metodologia adotada**

<b>Tempo</b>	20 min
<b>Modalidade de interação</b>	Interativo
<b>Propósito</b>	Diagnosticar a situação de aprendizagem de cada aluno.
<b>material de apoio</b>	Lousa

**Descrição:**

Análise das respostas às questões propostas na avaliação individual e das discussões realizadas nas etapas anteriores. Comentários finais integradores sobre o assunto abordado. Avaliação oral por parte dos alunos sobre as estratégias de ensino utilizadas e sobre seu aprendizado.

**Pesquisa de Opinião:**

Obter a impressão dos estudantes sobre a metodologia adotada

## COMENTÁRIOS FINAIS

A sequência didática elaborada neste trabalho, foi pensada numa metodologia diferenciada, através de simuladores do PhET e vídeos, permitindo ao aluno o despertar do interesse pela física moderna e um pouco de astronomia pois desenvolve uma abordagem diferente do que está acostumado. Podemos dizer que ensino passa a ter mais significado e o aluno, mais estimulado com sua participação ativa no processo de aprendizagem, acaba despertando seu interesse em aprender novos conceitos e perceber que a Física não está somente na sala de aula, mas no mundo que ele vive, visível e no invisível.

Em todo trabalho pedagógico observa-se uma preocupação intensa com que o aluno detenha de forma eficaz seu aprendizado. O estudante não pode ser um mero espectador de uma aula expositiva, pois possivelmente, assim será menor seu aprendizado. Poderá ocorrer memorização de informações, mas que possivelmente terão curto prazo. Metodologias são criadas para que favoreçam e estimulem o protagonismo dos alunos, pois quanto mais envolvimento ele tem no processo, maior será o seu aproveitamento.

Durante a sequência sugiro que o professor observe com atenção o andamento das atividades, deixe os alunos a vontade para explorarem os simuladores, mas esteja sempre presente para orientar quanto à sua utilização, não deixando de perder o foco quanto aos objetivos desejados. Ao final de cada encontro (aula) verifique se os objetivos foram atingidos e se é necessário retomar no início do próximo encontro alguns conceitos. Se necessário, refaça o planejamento e adeque as atividades para a realidade de seus alunos, organize etapas de acordo com os objetivos que deseja alcançar. Seja um articulador em sala de aula, entre o conhecimento e o estudante, coordenando atividades, orientando e incentivando para a busca do conhecimento.

## Anexo 1

### Ondas mecânicas e eletromagnéticas

Sabemos que estamos envolvidos por diversas ondas. Essas ondas podem ser mecânicas, eletromagnéticas ou gravitacionais.

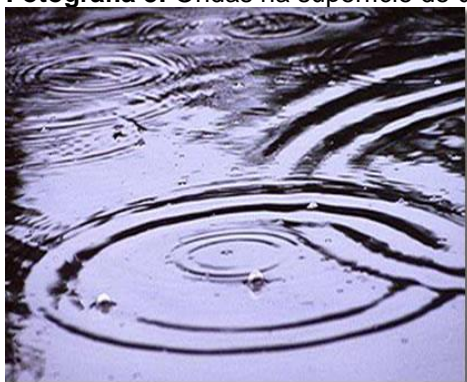
As ondas são perturbações em um meio que se propagam transmitindo energia de uma fonte de ondas para uma região do espaço que o envolve.

As ondas que melhor percebemos e são mais fáceis de compreender são as ondas mecânicas, simplesmente porque na maioria dos casos podemos ver<sup>16</sup>.

Uma perturbação é causada por alguém ou por alguma fonte, e esta perturbação propaga-se de um ponto para o outro na forma de pulsos<sup>17</sup>. Por exemplo:

- Uma pedra que é jogada nas águas calmas de um lago;

**Fotografia 3:** Ondas na superfície de um líquido.



**Fonte:** <https://moodle.ufsc.br/mod/book/tool/print/index.php?id=504285> acesso em 19/06/2020.

- Um alto falante causa uma perturbação nas moléculas de ar<sup>18</sup>, e esta perturbação propaga-se até nossos ouvidos permitindo que possamos ouvir<sup>19</sup> o som gerado pelo mesmo<sup>20</sup>;

---

16

[https://www.youtube.com/watch?v=NQi9OmaAUKI&index=42&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtIYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S](https://www.youtube.com/watch?v=NQi9OmaAUKI&index=42&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtIYj6M7eBM9eb_u4zg0S)

17

[https://www.youtube.com/watch?v=h0kLMLRX9SY&index=85&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtIYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S](https://www.youtube.com/watch?v=h0kLMLRX9SY&index=85&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtIYj6M7eBM9eb_u4zg0S)

18

<https://www.youtube.com/watch?v=QwNO1LW31jY>

19

<https://www.youtube.com/watch?v=rHvtROxCroA>

20

<https://www.youtube.com/watch?v=AG5HYoHojgc>

- O movimento de placas tectônicas que se propagam pela superfície terrestre causando os terremotos<sup>21</sup>.
- O movimento na extremidade livre de uma corda esticada que se propaga por toda a corda<sup>22</sup>.

As ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar e por essa forma que não poderá ocorrer no vácuo.

Mas o mundo das ondas não é apenas mecânico. Temos também as ondas que podem ocorrer no vácuo entre elas as ondas eletromagnéticas. Estas ondas surgem quando ocorre variação de um campo elétrico no tempo e que produz um campo magnético também variante no tempo e que se propagam no espaço. Vale salientar que estas ondas eletromagnéticas são sempre produzidas por cargas elétricas aceleradas ou retardadas<sup>23</sup>.

Veja mais casos de ondas mecânicas:

- Cuba de ondas;

[https://www.youtube.com/watch?v=yGqfRB4EWEg&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtlYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S&index=49](https://www.youtube.com/watch?v=yGqfRB4EWEg&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtlYj6M7eBM9eb_u4zg0S&index=49)

- Corda tensionada;

[https://www.youtube.com/watch?v=qIXBnrSgpbQ&index=50&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtlYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S](https://www.youtube.com/watch?v=qIXBnrSgpbQ&index=50&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtlYj6M7eBM9eb_u4zg0S)

- Cordas de um violão

<https://www.youtube.com/watch?v=5ICHZjnxgTs>

- Na superfície da água;

[https://www.youtube.com/watch?v=6KY0Xh-xjX4&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtlYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S&index=51](https://www.youtube.com/watch?v=6KY0Xh-xjX4&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtlYj6M7eBM9eb_u4zg0S&index=51)

- Histórico de ondas eletromagnéticas;

<https://sites.google.com/site/eletricolphysics/contextualizacao-te/descobertas-ondas-eletromagneticas>

<sup>21</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=9nCN4PAMCwg>

<sup>22</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=YC6KzLuBOZY>

<sup>23</sup> [http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/ondas/ondas\\_eletromagneticas/](http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/ondas/ondas_eletromagneticas/)

### Formas de vibração das ondas

As ondas podem se diferenciar também pela sua forma de vibração. Dependendo do modo de vibração da fonte ou de sua natureza as ondas podem vibrar de maneira transversal ou longitudinal.

A onda longitudinal é aquela onde a oscilação ocorre na mesma direção do movimento de propagação da onda.

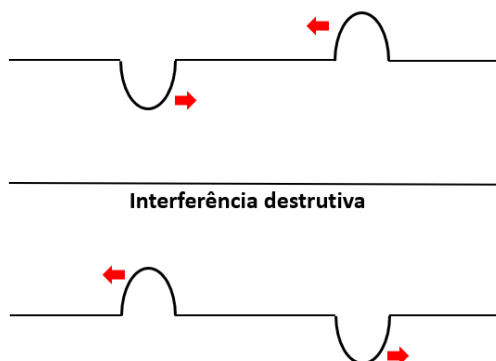
A onda transversal é aquela onde a oscilação é perpendicular à direção do movimento de propagação da onda<sup>24</sup>.

### Fenômenos ondulatórios

A interferência é o principal fenômeno usado nos interferômetros. Este fenômeno ocorre quando duas ondas de mesma natureza (mecânica, eletromagnética) se encontram e assim as energias transmitidas por elas podem se somar (interferência construtiva) ou subtrair (interferência destrutiva), modificando o formato da onda. Sendo que após este encontro as ondas seguem idênticas com a mesma velocidade, comprimento de onda, frequência, como se nada tivesse acontecido.

A interferência destrutiva ocorre quando duas ondas que se encontram estão em oposição de fase. A onda resultante dessa sobreposição possui uma amplitude que será a diferença entre as amplitudes das duas ondas. No instante seguinte seguem idênticas como se nada tivesse acontecido.

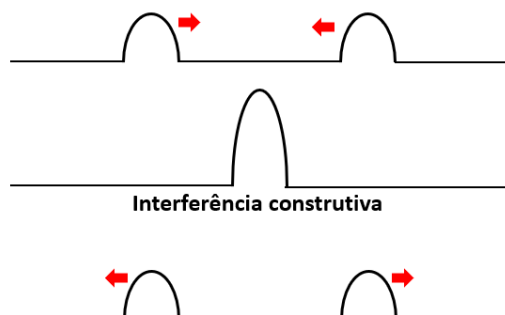
**Figura 6:** Interferência destrutiva



**Fonte:** o autor

Na interferência construtiva, as ondas estão em concordância de fase e dessa forma a amplitude resultante da superposição das ondas é a soma das amplitudes das ondas parciais.

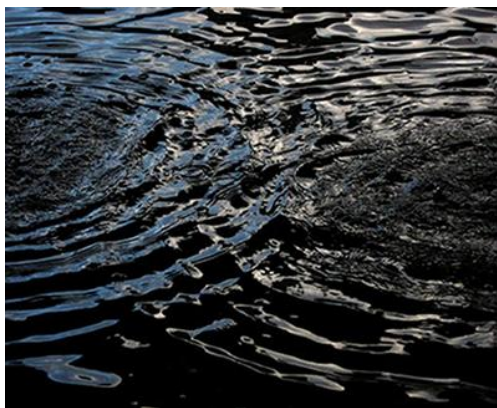
**Figura 7:** Interferência construtiva



**Fonte:** o autor

Numa cuba de ondas podem-se observar pontos onde há interferência destrutiva e outros pontos onde ocorre interferência construtiva.

**Fotografia 4:** Interferência de ondas na superfície de um líquido.



**Fonte:** <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/interferencia-ondas.htm> acesso em 19/06/2020

Mais sobre interferência e outros fenômenos:

- Interferência - Película de sabão

[https://www.youtube.com/watch?v=MoNOwr4xqIk&index=84&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtlYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S](https://www.youtube.com/watch?v=MoNOwr4xqIk&index=84&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtlYj6M7eBM9eb_u4zg0S)

- Interferência – cuba de ondas

[https://www.youtube.com/watch?v=AG5HYoHojgc&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtlYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S&index=83](https://www.youtube.com/watch?v=AG5HYoHojgc&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtlYj6M7eBM9eb_u4zg0S&index=83)

- Refração

[https://www.youtube.com/watch?v=CMd2KnrQwQI&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtlYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S&index=92](https://www.youtube.com/watch?v=CMd2KnrQwQI&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtlYj6M7eBM9eb_u4zg0S&index=92)

- Difração de ondas de rádio

<https://www.youtube.com/watch?v=pJPc8e5MXwo>

- Difração fendas e fio de cabelo

[https://www.youtube.com/watch?v=DYYGFb36lvE&index=94&list=PL1Dg4Oxxk\\_RJEtlYj6M7eBM9eb\\_u4zg0S](https://www.youtube.com/watch?v=DYYGFb36lvE&index=94&list=PL1Dg4Oxxk_RJEtlYj6M7eBM9eb_u4zg0S)

### **Intensidade de onda**

Uma fonte pontual pode emitir ondas para as diversas direções e considerando que a velocidade da onda seja igual em todas elas, a frente de onda será esférica, ou seja, a propagação da onda é como se fosse uma esfera se expandindo. Assim toda a energia liberada pela fonte deverá ser diluída em toda superfície definida pela frente de onda.

Desta forma a intensidade da onda em determinada posição, distante  $d$  da fonte pode ser dada por:

$$I = E/t \cdot A \text{ ou } I = P/A$$

Se esta frente de onda for esférica, temos:

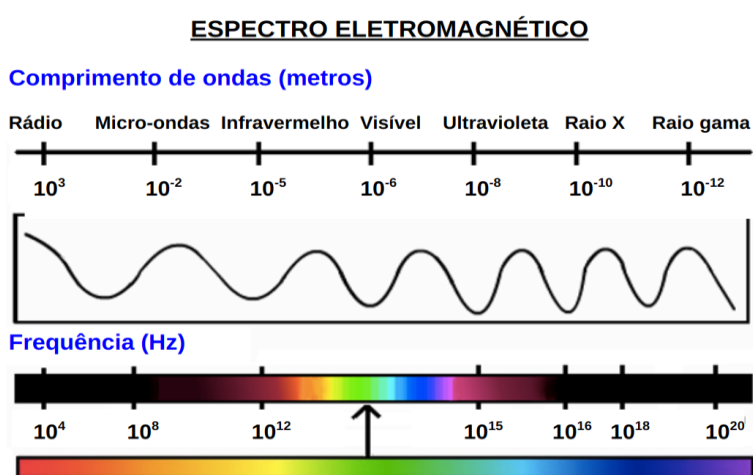
$$I = P/4\pi d^2$$

## Anexo 2

### Ondas eletromagnéticas e gravitacionais

De forma bastante conhecida, as ondas eletromagnéticas possuem espectro de ondas que vai desde as ondas de baixa frequência, como as ondas de rádio, com frequência na ordem de  $10^4$  Hz, até as de maior frequência como as da radiação gama, na ordem de  $10^{20}$  Hz.

**Figura 8:** Espectro eletromagnético das ondas



**Fonte:** o autor

Ao estudar o universo, o aparato usado na astronomia é o telescópio, que coleta a luz. Por muito tempo essa era a forma de se ver o universo. Com o tempo, a tecnologia foi usada a favor destas observações e o principal avanço foi a capacidade de observar não apenas a luz óptica, mas a radiação emitida pelas fontes celestes em todo o espectro eletromagnético. As ondas de rádio que apresentam grande comprimento de onda, são coletadas pelos radiotelescópios. Na detecção dessas ondas de grande comprimento de onda, quando coletadas mais de uma antena é possível com a combinação das ondas de uma mesma fonte produzir imagens de alta precisão de rádio galáxias a distâncias cosmológicas. Atualmente os telescópios captam ondas eletromagnéticas em praticamente todo o espectro eletromagnético<sup>25</sup>.

<sup>25</sup>

<https://www.youtube.com/watch?v=-C2erXakQIQ>

Mas existem algumas dificuldades nas observações, pois, mesmo não se conhecendo um limite absoluto no alcance dos comprimentos de onda eletromagnéticos, as formas mais familiares de ondas eletromagnéticas variam de metros (rádio) a femtômetros (raios gama).

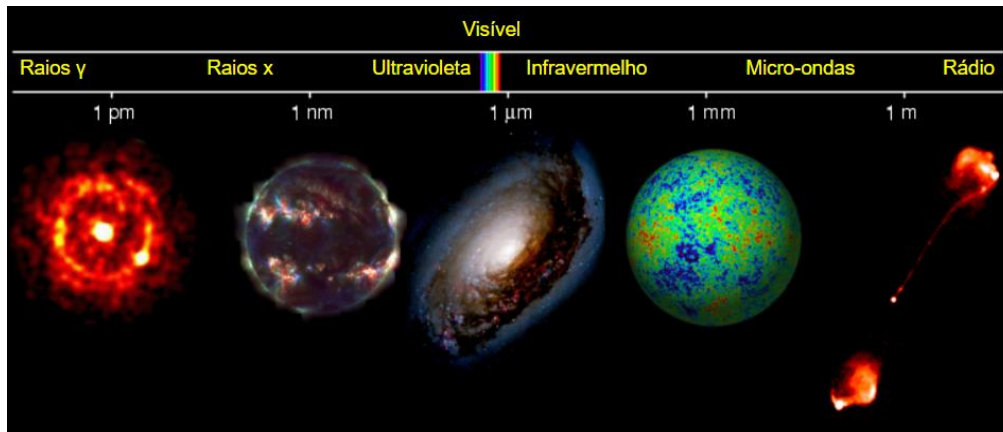
**Tabela 1:** Ondas eletromagnéticas geradas na natureza nas formas mais familiares.

Comprimentos de onda curtos (raios X, raios gama)	
São produzidos por transições de energia nuclear, ou radiação térmica da matéria nas energias nucleares, ou por aceleração de partículas não térmicas de alta energia (por exemplo, de plasmas densos confinados por fortes campos eletromagnéticos).	Os núcleos começam a se dissociar sob radiação na faixa do subpicômetro, e os núcleos individuais têm energias de repouso equivalentes aos fótons de comprimento de onda do femtômetro, o que define amplamente a extremidade superior das energias de fótons que normalmente surgem da matéria no universo atual.
Comprimentos de onda médios (ultravioleta pelo infravermelho)	
São produzidos principalmente por transições de energia atômica e por radiação térmica de matéria "comum" (atômica).	Um comprimento de onda de fótons de cerca de 10 nm ou menos é suficiente para quebrar a maioria das ligações moleculares e ionizar átomos, e define o final mais curto da banda ultravioleta. No outro extremo, as temperaturas mais baixas normalmente encontradas na natureza são de cerca de 3 kelvins, emitindo radiação térmica em comprimentos de onda em torno de 1 mm:
Comprimentos de onda longos (micro-ondas e ondas de rádio)	
São produzidos por processos eletromagnéticos coerentes em larga escala não térmicos, como equipamentos elétricos não blindados, ou a partir de plasmas difusos acelerados por campos magnéticos.	A ionosfera da Terra bloqueia ondas de rádio com mais de 10 m, enquanto o plasma interestelar bloqueia ondas com mais de 10 km, o que define o limite de comprimento de onda da radioastronomia.

Fonte: <http://www.tapir.caltech.edu/~teviet/Waves/emwave.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=YsLDejmD4OM>

**Figura 9:** Ondas eletromagnéticas e o que elas podem observar.

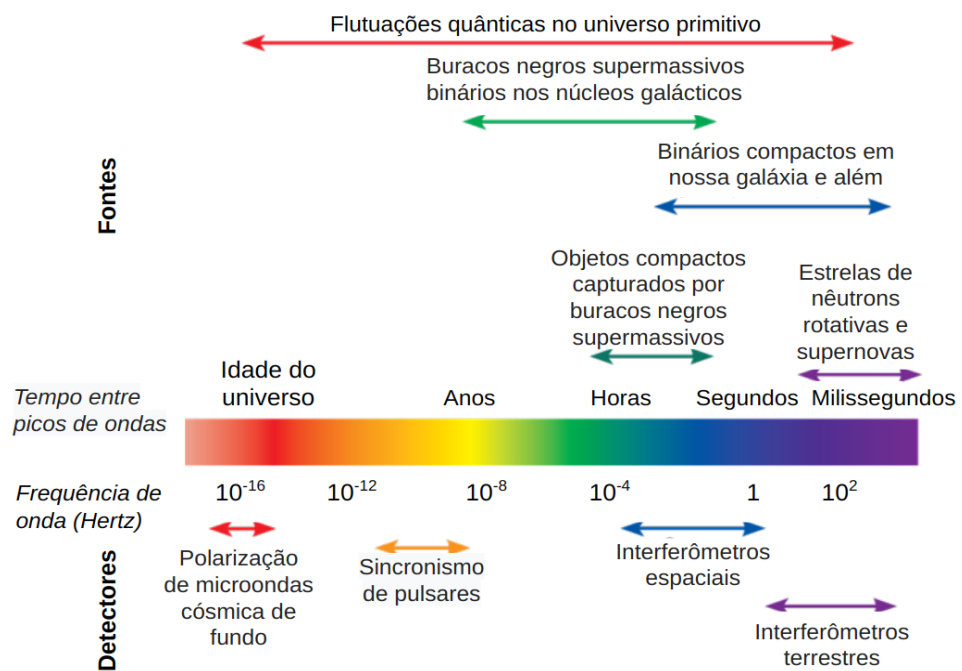


Fonte: <http://www.tapir.caltech.edu/~teviet/Waves/emwave.html>

As ondas gravitacionais são provenientes dos eventos que ocorrem no universo distorcendo o espaço-tempo. Os comprimentos de onda das ondas gravitacionais emitidas em tais eventos são tipicamente da mesma ordem que a dimensão do sistema. Por exemplo, as ondas gravitacionais emitidas pela fusão de buracos negros com massas entre 10 e 100 vezes a massa solar, os comprimentos de onda são tipicamente de cem a mil km.

Assim, pode-se dizer que o espectro das ondas gravitacionais se inicia no evento Big Bang, onde a matéria inicial era muito pequena e a onda gravitacional apresenta pequeno comprimento de onda ou grande frequência.

**Figura 10:** Fontes e detectores de ondas gravitacionais.



Fonte: <http://www.tapir.caltech.edu/>

### Anexo 3

#### Textos e vídeos adicionais

Assista:

<https://www.youtube.com/watch?v=UA1qG7Fjc2A>

<https://www.youtube.com/watch?v=248I2U8DsXQ>

<https://www.youtube.com/watch?v=j-u3IEgcTiQ>

Leia:

[http://lilith.fisica.ufmg.br/~labexp/roteirosPDF/Interferometro\\_de\\_Michelson.pdf](http://lilith.fisica.ufmg.br/~labexp/roteirosPDF/Interferometro_de_Michelson.pdf)

<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/10025/14562>

<http://sites.ifi.unicamp.br/laboptica/files/2013/01/michelson1.pdf>

[http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/LIGO\\_-\\_ScienceSummary\\_Portuguese.pdf](http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/LIGO_-_ScienceSummary_Portuguese.pdf)

<http://www.observatorio.ufmg.br/pas19.htm>

<https://www.youtube.com/watch?v=1pm7kHul5Ys>

<https://www.youtube.com/watch?v=W9Q7yCxR-TU>

<https://www.youtube.com/watch?v=mRuYo68dWPg>