



MARIA ADNA SENA DA SILVA

**A GRAVIDADE NEWTONIANA E EINSTEINIANA NÃO É SÓ UMA
DICOTOMIA CONCEITUAL**

SANTA CRUZ / RN
AGOSTO 2019

MARIA ADNA SENA DA SILVA

**A GRAVIDADE NEWTONIANA E EINSTEINIANA NÃO É SÓ UMA
DICOTOMIA CONCEITUAL**

Trabalho de Conclusão apresentado à
Coordenação do Curso, como requisito à
obtenção do título de Licenciada em Física,
pelo Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Rio Grande do
Norte Campus Santa Cruz.

ORIENTADOR: Prof. Me. Geogenes Melo
de Lima

SANTA CRUZ / RN
Agosto 2019

MARIA ADNA SENA DA SILVA

A GRAVIDADE NEWTONIANA E EINSTEINIANA NÃO É SÓ UMA DICOTOMIA CONCEITUAL

Trabalho de Conclusão apresentado à
Coordenação do Curso, como requisito à
obtenção do título de Licenciada em Física,
pelo Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Rio Grande do
Norte Campus Santa Cruz.

Trabalho de conclusão de curso apresentado e aprovado em ___/___/___,
pela seguinte Banca Examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Professor Orientador: Prof. Me. Geogenes Melo de Lima
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

1ª Examinador: Prof. Me. Roney Roberto de Melo Sousa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

2º Examinador: Prof. Dr. Luiz Jorge Negri
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

SANTA CRUZ / RN
AGOSTO 2019

Catálogo da publicação na fonte
SIBi/IFRN

S586g Silva, Maria Adna Sena da.

A gravidade newtoniana e einsteiniana não é só uma dicotomia conceitual. / Maria Adna Sena da Silva. – 2019.

65 f : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Santa Cruz, 2019.

Orientador: Prof. Me. Geogenes Melo de Lima.

1. Física - Gravidade. 2. Gravitação Universal. 3. Unidade de Ensino Potencialmente Significativa. 4. UEPS. I. Lima, Geogenes Melo de. II. Instituto Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

CDU 53

Dedico este trabalho à minha amada família, professores, amigos e a todos os que me ajudaram a trilhar esta grande trajetória da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial aos meus amados pais, Francisca do Nascimento Sena e José Aldenor da Silva, por ensinar-me a ser original, autêntica, verdadeira e nunca desistir dos meus sonhos.

Ao meu orientador, Geogenes Melo de Lima, pela sua capacidade de passar tão bem o conteúdo, por todo o comprometimento e pela singular dedicação e paciência na orientação dessa monografia. Ter traçado esse caminho sob os cuidados de uma pessoa com sua experiência é, verdadeiramente, uma satisfação.

A todos os professores que fizeram parte da minha vida acadêmica, em especial, Roney Melo e Luiz Jorge Negri, por aceitarem o convite para a apreciação dessa monografia. Aos professores Caio Vasconcelos e Jardel Lucena pela ajuda e contribuição na construção deste trabalho de conclusão de curso.

As minhas irmãs, incentivadoras e amigas: Aldaiane, Aldenize, Amanda e Aline. As minhas lindas sobrinhas, Ana Júlia e Stella Alicia, por serem também motivadoras desse sonho.

A todos os amigos que fiz, de forma particular, a João Victor e Sandyeva por estarem sempre comigo e compartilharem conhecimentos e experiências que levarei para toda vida, valeu, com vocês as madrugadas de estudos foram mais prazerosas!

A Josy Keylla, Jéssica Rejane e Erikarlos David por me proporcionarem risadas e descontrações durante os períodos de aflição, que me encorajaram a seguir a diante.

A todos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte *Campus* Santa Cruz (IFRN) que de alguma forma fizeram parte da minha formação.

E, é claro, a Deus, o maior de todos os mestres, sentindo da minha vida, que em todos os momentos esteve aqui, me ensinando a caminhar e a enfrentar meus medos. O real segredo de eu não desistir. Obrigada!

“O segredo inteiro de uma vida de sucesso é encontrar qual o nosso destino e então o concretizar.”

Henry Ford

RESUMO

A GRAVIDADE NEWTONIANA E EINSTEINIANA NÃO É SÓ UMA DICOTOMIA CONCEITUAL

Uma das observações mais notórias e simples da natureza é que, se você segurar uma pedra na mão e soltá-la, a pedra cai. Por que razão isso acontece? A resposta é: a gravidade. Foi Isaac Newton (1643-1727), um dos mais brilhantes cientistas quem sugeriu que uma força misteriosa, a força da gravidade, faz com que os objetos voltem para a Terra ao serem lançados para cima. Ele também afirmava ser essa mesma força a responsável em manter o movimento dos planetas e da Lua orbitando o Sol. Apesar da teoria de Newton ter tido um sucesso extraordinário, explicando muitos fatos e mesmo prevendo fatos novos, ela não é uma teoria estritamente correta da gravitação. Ela falha na explicação de vários fenômenos e alguns de seus insucessos fizeram com que Einstein propusesse uma nova teoria, a Teoria da Relatividade Geral. O desenvolvimento desse trabalho tem como objetivo analisar um pouco mais a fundo o conceito de gravidade aos olhos da Física Clássica (newtoniana) e da Física Moderna (Einsteiniana). Essa análise se apoiará no desenvolvimento de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) embasada na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel. A UEPS foi elaborada segundo os critérios estabelecidos por MOREIRA, (2011). Esta destina-se a auxiliar o professor de Física que queira ensinar os conceitos da gravidade através de um viés mais reflexivo e menos matemático. Assim, além de inserir o estudo de alguns conceitos que fazem parte do bojo da Teoria da Relatividade Geral, a UEPS permite que os estudantes possam compreender os limites da Teoria da Gravitação de Newton. Como também as mudanças radicais na compreensão e interpretação propostas pela Teoria da Relatividade Geral para o entendimento de tempo e de espaço.

Palavras-chave: Gravidade, Gravitação Universal, Relatividade Geral, Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS).

ABSTRACT

NEWTONIAN AND EINSTEINIAN GRAVITY ARE NOT ONLY A CONCEPTUAL DICHOTOMY

One of nature's most notorious and simple observations is that if you hold a stone on your hand and drop it, the stone falls. Why does it happen? The answer is: - Gravity. It was Isaac Newton (1643-1727), one of the most brilliant scientists who suggested that a mysterious force, the force of gravity by which all things are brought toward. He also said that this same force is responsible for maintaining the planets motion and the moon orbiting the sun. Although Newton's theory has had extraordinary success, explaining many facts and even predicting new facts, it is not a completely correct theory of gravitation. It fails explaining a large number of phenomena, and some of its failures made possible that Einstein propose a new theory, the Theory of General Relativity. The main target of this work is to analyze a little more deeply the concept of gravity using Classical (Newtonian) and Modern (Einsteinian) Physics. This analysis will be conducted by a Potentially Significant Teaching Unit (PSTU) based on David Ausubel's Theory of Significant Learning. The PSTU was elaborated according to the criteria established by MOREIRA (2011). This unit will be useful to assist physics teachers who want to expose the gravity concepts through a more reflective and less mathematical bias. At this way, besides introducing the study of some concepts that are part of the General Relativity Theory, the PSTU will allow students to understand the limits of Newton's Theory of Gravitation and the radical changes in the understanding and in the interpretation proposed by General Theory of Relativity for the conception of time and space.

Key words: Gravity, Universal Gravitation, General Relativity, Potentially Significant Teaching Unit (PSTU).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - A TEORIA CLÁSSICA DA GRAVITAÇÃO	3
2.1 GALILEI GALILEU E O ESTUDO DO MOVIMENTO DOS CORPOS	3
2.2 AS LEIS DE KEPLER DO MOVIMENTO PLANETÁRIO	5
2.3 TEORIA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL DE NEWTON.....	7
CAPÍTULO 3 - FORÇA DE CAMPO	11
CAPÍTULO 4 - A TEORIA MODERNA DA GRAVITAÇÃO	15
4.1 O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA	17
4.2 GEOMETRIA NÃO EUCLIDIANA	21
4.3 A GRAVIDADE COMO A CURVATURA NO ESPAÇOTEMPO	25
CAPÍTULO 5 - APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	28
5.1 UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA.....	30
CAPÍTULO 6 - A UEPS “A GRAVIDADE NEWTONIANA E EINSTEINIANA NÃO É SÓ UMA DICOTOMIA CONCEITUAL”	32
6.1 SEQUÊNCIAS DE ENSINO	32
6.1.1 SEQUÊNCIA DE ENSINO PARA O PRIMEIRO ENCONTRO	32
6.1.2 SEQUÊNCIA DE ENSINO PARA O SEGUNDO ENCONTRO	33
6.1.3 SEQUÊNCIA DE ENSINO PARA O TERCEIRO ENCONTRO.....	33
6.1.4 SEQUÊNCIA DE ENSINO PARA O QUARTO ENCONTRO	34
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
APÊNDICE A	38
A-1 ATIVIDADES PARA SALA	38
A-2 ATIVIDADES PARA CASA	49
A-3 SEQUÊNCIAS DE ENSINO	55

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Até o final do século XIX, a mecânica newtoniana, juntamente com o Eletromagnetismo e a Termodinâmica constituíam o cerne da Física Clássica. Essas áreas estavam tão bem estabelecidas que os cientistas acreditavam que a Física já estava totalmente definida. A certeza de que já se sabia de tudo era tão grande que Lorde Kelvin (William Thomson – 1824-1907) chegou a afirmar que não havia mais nada a ser descoberto sendo necessário aos físicos apenas melhorar a precisão das medidas obtidas.

Entretanto, no início do século XX, apareceram vários fatos importantes que não podiam ser explicados em termos dos conceitos que haviam sido até então formulados. Embora esses fatos estendam-se ao estudo de vários fenômenos, centralizaremos nossa atenção ao estudo da gravidade.

Um dos grandes sucessos da Mecânica Clássica foi a Teoria da Gravitação Universal, proposta por Isaac Newton (1643-1727). Newton interpretou a gravidade como uma força, referida como força gravitacional, atrativa entre corpos, que é diretamente proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre elas.

O grande problema teórico, tema da presente monografia, é discutir como hoje se responde a seguinte pergunta: como se explica a interação entre massas? O estudo que se produziu para dar respostas a esse questionamento foi um dos pontos de partida para o nascimento da Teoria da Relatividade - inicialmente Teoria da Relatividade Restrita (TRR) e, posteriormente, a Teoria da Relatividade Geral (TGR), publicada por Albert Einstein, em 1905 e 1916 respectivamente.

A grande intervenção de Einstein em relação à teoria newtoniana da Gravitação Universal foi considerar que os conceitos de espaço e tempo não deveriam ter caráter absoluto, devendo ser descritos por uma geometria em um espaçotempo quadrimensional, no qual o tempo seria o indicativo da quarta dimensão. Segundo Maia (2009) a nova teoria em termos de espaços curvos e não euclidiana determina que qualquer massa criaria uma curvatura no espaçotempo. A partir desta teoria foi

possível descrever de forma mais sofisticada o que seria a gravidade. A teoria proposta por Einstein modificou o conceito de gravidade da mecânica newtoniana.

Mas o que é exatamente essa curvatura no espaçotempo? Como Einstein conseguiu explicar esta nova ideia? A teoria da Gravitação de Newton está errada? O presente trabalho tem por finalidade fazer uma análise do desenvolvimento dos conceitos da teoria da gravidade, de Newton a Einstein, tentando responder esses questionamentos e como as explicações dadas por Einstein deram origem a uma nova forma de pensar o Universo.

Com o surgimento da teoria da gravidade de Einstein, chamada Relatividade Geral, a mecânica newtoniana e a visão tradicional de um espaço imutável e vazio, no qual os eventos do mundo se desdobram, são substituídas pela ideia de espaçotempo como uma entidade flexível e deformável pela matéria nele acomodada e que, por sua vez, descreve a maneira como os corpos, a matéria ou a luz, devem se mover. De acordo com Maia (2009) gravidade não é meramente uma força de atração que age entre matéria: é sim uma distorção do espaçotempo.

Isaac Newton e Albert Einstein são os dois grandes nomes que se destacaram no estudo da teoria da gravidade. Nesse sentido objetivamos nesse trabalho fornecer um entendimento básico acerca do conceito de gravidade na perspectiva da teoria clássica de Newton e na moderna de Einstein.

Vê-se com frequência nos livros destinados ao Ensino Médio uma atenção maior na temática da gravidade quando analisada no âmbito da Física Clássica. A concepção da gravidade aos olhos da Física contemporânea é pouco citada. Contudo, estamos no século XXI onde muitas das tecnologias presentes no nosso dia a dia só são explicadas pela Física desenvolvida a partir dos anos de 1900.

A Teoria da Relatividade Geral (TRG) surge para sobrepor a Teoria da Gravitação Universal, visto que essa segunda não conseguia explicar alguns resultados e questionamentos que começavam a surgir com a chegada do século XX.

Verificaremos que a TRG constitui uma nova visão de mundo, que deveria ser apresentada aos estudantes nas séries iniciais do Ensino Médio. Partindo desse pressuposto, criamos uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS),

embasada na Teoria da Aprendizagem de Ausubel, que aborda o ensino da gravidade tanto na visão newtoniana quanto na einsteiniana.

CAPÍTULO 2 - A TEORIA CLÁSSICA DA GRAVITAÇÃO

Uma das observações mais notórias e simples da natureza é que se você segurar uma pedra na mão e soltá-la, a pedra cai. Por que razão isso acontece? A resposta é: a gravidade.

Embora atualmente saibamos pela Lei da Gravitação Universal de Newton que a gravidade é uma força que faz tanto a pedra cair quanto a Lua orbitar à Terra ou os planetas orbitarem o Sol – isso não é originário apenas de Newton. Foi necessária a contribuição de vários estudiosos para que por fim Newton conseguisse desenvolver a Lei da Gravitação Universal.

Essa compreensão de que foram necessários estudos e resultados anteriores e que Newton de certa forma estava ciente e aceitava tal fato, pode ser vista na frase por ele dita “se cheguei tão longe é porque me apoiei sobre ombros de gigantes”.

2.1 GALILEI GALILEU E O ESTUDO DO MOVIMENTO DOS CORPOS

Conta-se que Galileu Galilei (1564-1642), considerado o introdutor do método experimental na Física, no final do século XVI, abandonou vários objetos de pesos diferentes da Torre de Pisa, na Itália, em suas especulações sobre as teorias aristotélicas a respeito da queda dos corpos¹. “Galileu reuniu uma grande quantidade de professores aristotélicos e seus alunos e mostrou que os corpos de diferentes materiais, uns pesados e outros menos densos, chegam à Terra ao mesmo instante” (TORIBIO, 2012).

É comum as pessoas, de modo intuitivo, presumirem que os objetos mais pesados caem mais rapidamente que os mais leves. Afinal, ao ser observado no cotidiano, uma folha de papel e uma pedra caírem para a Terra, percebe-se que a folha cai de forma suave, e por isso mais lentamente, como afirmava Aristóteles (384 a.C - 322 a.C). Entretanto, Galileu faz uma descoberta surpreendente que é fundamental para a Mecânica Clássica: na ausência de resistência do ar, todos os

¹ Alguns estudiosos da História e Filosofia das Ciências creditam esse fato um caráter folclórico.

corpos sofrem iguais variações de velocidade em iguais intervalos de tempo, independentemente de sua massa ou composição, isto é, verificou que o movimento dos corpos é uniformemente acelerado. “Estava provado que na queda livre dos corpos a velocidade não era função do peso” (TORIBIO, 2012).

Galileu com sua nova teoria rompeu com o pensamento aristotélico de que para um corpo continuar a se mover a uma velocidade constante uma força deveria ser aplicada. Pelo contrário, Galileu verificou que os objetos continuarão em constante movimento a não ser que uma força, por vezes o atrito, seja exercida sobre eles. As experiências de Galileu deram origem às sementes das quais brotam o princípio da inércia, mais tarde sintetizada por Newton.

No Diálogo sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo, o Ptolomaico e o Copernicano, de 1632, Galileu faz com que os personagens Salviati e Simplicio desse livro dialoguem sobre tal questão. Ao discutir a causa que produz o movimento de diversos corpos, Salviati questiona: “Eu gostaria que me dissesse o que move as partes da Terra para baixo”. Simplicio responde: “A causa desse efeito é bem conhecida, e todos sabem que é a gravidade”. Salviati retruca que “todos sabiam o nome, mas não a essência dessa coisa” (GALILELO, 1970).

Galileu fez um avanço impressionante na compreensão da Mecânica e na maneira como os corpos se movem sob a gravidade, mas ele não abordou as razões para os objetos se comportarem como eles fazem. A explicação do porquê de os corpos caírem, tal como hoje aceita pela ciência, vai exigir uma conceituação clara e precisa do conceito de força – e isso se deve a Isaac Newton.

Esta lei universal da queda livre é um dos “primeiros trabalhos envolvendo os conceitos chave para o estabelecimento do Princípio de Equivalência” ACEVEDO, MORAIS e PIMENTEL (2019), um dos pilares da Física Moderna. Albert Einstein pressupõe expressamente este princípio como universalmente válido para sua Teoria da Relatividade Geral.

Podemos perceber que existem dois aspectos para questões sobre a gravidade. Existe a Física da situação que consiste em encontrar as equações que regem a queda dos corpos, agindo pela gravidade, e para isso é necessário um entendimento adequado das leis da Mecânica. Depois, há a questão mais filosófica do porquê das leis e qual o mecanismo que conduzem aos efeitos gravitacionais observados.

A teoria aristotélica cobriu ambos os aspectos com uma descrição de como os corpos reagem sob a gravidade e também uma razão para os efeitos, ou seja, a "tendência natural" de uma pedra voltar ao seu lugar de origem (Terra). Essa explicação perdurou por quase dois mil anos. Mas ambos os aspectos são, como se sabe hoje, incorretos.

2.2 AS LEIS DE KEPLER DO MOVIMENTO PLANETÁRIO

No final da idade média já se havia reunido fatos que logo levariam à descoberta da lei universal da gravidade. Esta descoberta está relacionada com os nomes de muitos estudiosos eminentes dos séculos XVI e XVII, dentre eles estão Tycho Brahe e Johannes Kepler. Brahe computou em seu observatório Uraniborg na ilha de Ven, perto de Copenhague, observações sistemáticas do movimento planetário que permitiram a descoberta das, hoje conhecidas como, leis Kepler que regem o movimento dos planetas.

Após longos anos de análise da órbita planetária de Marte, Kepler chegou à conclusão de que para descrever o movimento dos planetas ao redor do Sol deveriam ser consideradas órbitas elípticas. O próprio Kepler teve grande dificuldade em admitir que as órbitas planetárias não fossem circulares.

- i) A primeira lei de Kepler é assim expressa: Todos os planetas do sistema solar executam trajetória elípticas em volta do Sol, este por sua vez ocupa um dos focos dessa elipse (ROCHA, 2011).

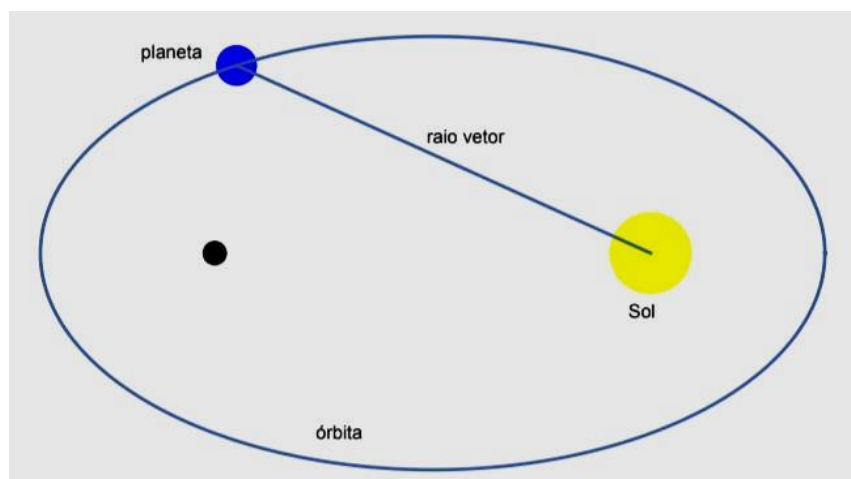


Figura 2.1: Esquema da órbita de um planeta ao redor do Sol.
Fonte: Ferreira, Almeida e Gondim (2015).

Além de descrever a forma das órbitas planetárias, Kepler também observou que a velocidade de movimento de um planeta em sua órbita deveria mudar. Assim, quando um planeta está mais perto do Sol ele se move mais rápido do que quando está em seu ponto mais distante.

- ii) A segunda lei de Kepler tem o enunciado: A linha que liga o Sol aos planetas varre áreas iguais em intervalos de tempos iguais (ROCHA, 2011).

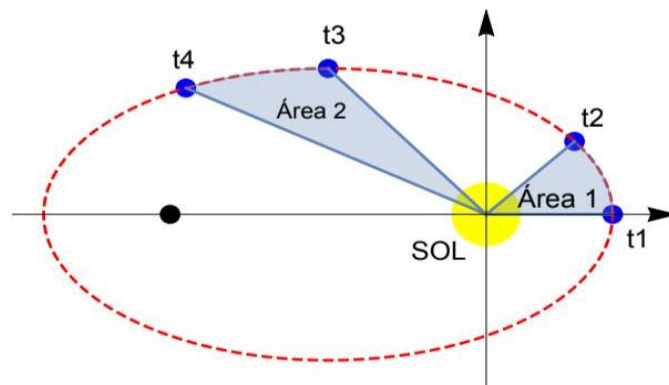


Figura 2.2: Esquema representando a lei das áreas.
Fonte: Ferreira, Almeida e Gondim (2015).

Após vários anos de pesquisa, Kepler descobriu uma sofisticada relação matemática entre a distância planeta-Sol e o tempo que o planeta leva para completar sua órbita. Nascia a terceira lei de Kepler.

- iii) A terceira lei de Kepler conhecida como Lei Harmônica, enuncia: O quadrado dos períodos das órbitas dos planetas é proporcional ao cubo de suas distâncias médias ao Sol (ROCHA, 2011).

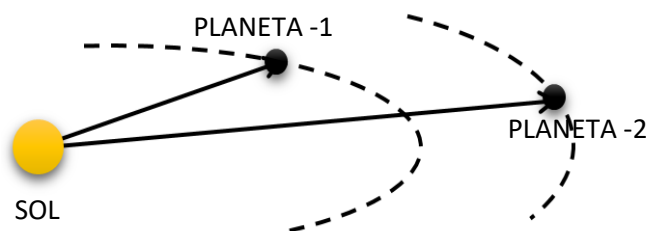


Figura 2.3: Esquema representando a lei dos períodos.
Fonte: Ferreira, Almeida e Gondim (2015).

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3}$$

Essas relações matemáticas simples forneceram uma explicação para todas as observações do movimento de planetas acumulados por séculos. Além disso, as Leis de Kepler são gerais, uma vez que são válidas no caso de qualquer objeto em órbita em torno de outro.

As descobertas da forma elíptica das órbitas dos planetas e as variações de velocidade, por Kepler, tornaram impossível apoiar a ideia de que o movimento planetário é um movimento natural que não requer explicações. Muitos pensadores questionaram a causa desse movimento. Além disso, outras questões semelhantes ficaram sem resposta. O que traz objetos de volta ao chão quando eles são jogados no ar? Por que somos mantidos no chão enquanto a Terra gira sobre si mesma? Por que a Lua não cai na Terra como uma maçã se destacando de uma árvore?

2.3 TEORIA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL DE NEWTON

Foi Isaac Newton (1643-1727), um dos mais brilhantes cientistas, quem sugeriu que uma força misteriosa, a gravidade, faz com que os objetos voltem para a Terra ao serem lançados para cima e que mantém o movimento dos planetas e da lua. O seu trabalho é a fundamentação da Mecânica na qual já existia alguns resultados importantes como os trabalhos de Galileu e Kepler alguns anos antes.

Durante o período da peste, Newton se ver obrigado a abandonar a faculdade Trinity College em Cambridge, retornando para a sua casa em Woolsthorpe. Este período permitiu-lhe tempo para desenvolver as suas ideias sobre os movimentos planetários e o conceito de gravitação – que será discutido neste trabalho. Para chegar a essa conclusão, Newton já havia enunciado três leis do movimento de corpos baseadas, entre outras coisas, no trabalho de Galileu. Essas três leis são:

1ª lei: *Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele* (NEWTON, 2012, p. 53).

2ª lei: *A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida* (NEWTON, 2012, p. 54).

3ª lei: *Para toda ação há sempre oposta uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas as partes opostas* (NEWTON, 2012, p. 54).

A confirmação da validade da Lei da Gravitação Universal de Newton que incorpora a ideia da queda dos corpos de Galileu e, por outro lado, explicou as Leis Kepler do movimento planetário. Ao mesmo tempo unificou as leis da Física, ou seja, os fenômenos que ocorriam nos céus e na Terra eram regidos pelas mesmas leis. “A genialidade de Newton foi reconhecer que o campo gravitacional que faz com que a maçã caia é a mesma que mantém a Lua em órbita em torno da Terra e que mantém os planetas girando em redor do Sol” (HIODO, 2009).

Ao relacionar suas leis com as de Kepler (particularmente a Lei Harmônica), Newton formulou uma lei mais geral para o movimento dos planetas, a lei da Gravitação Universal. Essa lei explica que dois objetos se atraem com uma força proporcional ao produto de sua massa e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa.

Vamos tratar de forma simplificada a dedução da Lei da Gravitação Universal. Considere um planeta de massa m orbitando o Sol de massa M em uma trajetória aproximadamente circular de raio R como mostra a figura.

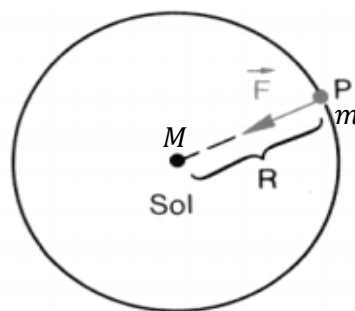


Figura 2.4: Representação esquemática de um planeta em movimento circular uniforme ao redor do Sol.

Fonte: Prass (2015).

A força gravitacional exerce o papel de resultante centrípeta. Então, aplicando a segunda 2ª Lei de Newton, podemos escrever que:

$$\vec{F}_c = m \cdot \vec{a}_c$$

Sendo o módulo da aceleração centrípeta (\vec{a}_c) dado por:

$$a_c = \frac{v^2}{R} \quad 2.3$$

Assim, a intensidade da força centrípeta fica determinada por:

$$|\vec{F}_c| = m \frac{v^2}{R} \quad 2.4$$

Sabemos que a velocidade tangencial de uma partícula em movimento circular é:

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad 2.5$$

Logo, teremos:

$$|\vec{F}_c| = m \frac{4\pi^2 R}{T^2} \quad 2.6$$

Multiplicando e dividindo a Eq. 2.6 por R^2 ficamos com:

$$|\vec{F}_c| = m \frac{4\pi^2 R^3}{T^2 R^2} \quad 2.7$$

Observamos que a grandeza $\frac{R^3}{T^2}$ corresponde à terceira lei de Kepler e é igual a uma constante K :

$$|\vec{F}_c| = m \frac{4\pi^2}{R^2} K \quad 2.8$$

A constante K também pode ser expressada na forma:

$$K = \frac{GM}{4\pi^2} \quad 2.9$$

Substituindo o valor da constante K (Eq.2.9) na Eq.2.8, a intensidade da força de atração gravitacional torna-se:

$$F = F_c = G \frac{mM}{R^2} \quad 2.10$$

Por fim, a Eq. 2.10 é a representação matemática da Lei da Gravitação Universal anteriormente enunciada.

A força gravitacional é uma força conservativa, logo pode ser derivada de um potencial:

$$F = -\nabla\phi \quad 2.11$$

Podemos então reescrever a lei da Gravitação Universal, pela Eq. 2,11, que é conhecida como a equação de Poisson na forma:

$$\nabla^2\phi = 4\pi G\rho \quad 2.12$$

Onde ∇^2 é o laplaciano e ρ é a densidade total de massa.

A força gravitacional é uma força atrativa cuja intensidade diminui com o quadrado da distância. Essa interação, cuja intensidade mesmo sendo relativamente baixa, é responsável por manter a estabilidade dos planetas, estrelas e galáxias.

No famoso exemplo em que a maçã² cai de uma árvore, nota-se que a Terra exerce uma força para fazer a maçã cair, e a maçã exerce uma força igual e oposta na Terra, dada pela Eq. 2.10. Da mesma forma, para as pessoas que estão no solo, a Terra exerce uma força ainda maior sobre elas do que na maçã. As pessoas exercem um poder igual e oposto na terra (Terceira Lei de Newton). Como a massa da Terra é muito maior que a massa de uma pessoa ou de uma maçã, a força gravitacional que uma pessoa ou mesmo muitas pessoas exercem sobre a Terra passa essencialmente despercebida. “A força exercida sobre um corpo na superfície da Terra é devido à atração da Terra” (HIODO, 2009).

A força gravitacional entre a Terra e a maçã, ou qualquer outro objeto de massa (m) pequena, em relação Terra, em sua superfície é determinada pela Segunda Lei de Newton, $F = m \cdot a_g$.

$$m \cdot g = G \frac{M_T \cdot m}{R^2} \quad 2.13$$

Onde g é a aceleração gravitacional e M_T é a massa da Terra. Neste contexto, a aceleração gravitacional é dada por:

² Alguns estudiosos da História e Filosofia das Ciências creditam esse fato um caráter folclórico.

$$g = G \frac{M_T}{R^2} \quad 2.14$$

No entanto, Isaac Newton não explicou como esta força da gravidade é transmitida de um corpo a outro. Ele entendeu como a força gravitacional afeta a trajetória dos objetos, mas não porque isso acontece. Foi somente no século XX, que esse impasse foi solucionado, por Albert Einstein, em sua Teoria da Relatividade Geral. O desenvolvimento da Relatividade de Einstein nas primeiras décadas do século XX veio como uma nova forma de responder aos problemas não solucionados pela Mecânica Clássica.

CAPÍTULO 3 - FORÇA DE CAMPO

As forças da natureza podem ser classificadas em dois tipos: forças de contato e forças campo. As forças de contato, como o próprio nome indica, são aquelas que resultam do contato direto entre corpos, como no caso da força de atrito.

A maioria das interações entre corpos é entendida mecanicamente, através do contato de um objeto com outro, em uma relação de causa e efeito. Na prática, verifica-se esse tipo de força quando empurramos ou puxamos um objeto tentando movê-lo. Sendo assim, se não houver contato, a força deixa de agir sobre o corpo.

No caso das forças de campo ou de ação à distância, a aplicação da força ocorre sem que haja contato sobre os corpos. Como por exemplo: a força gravitacional, a força elétrica e a força magnética. Todavia, neste trabalho, concentraremos nossa atenção apenas nas forças de campo, mais precisamente a força gravitacional.

Vimos no capítulo anterior que, de acordo com a Mecânica Clássica, quando soltarmos um corpo de determinada altura ele cai em direção à Terra, devido à ação de uma força atrativa que o puxa para baixo. Note que não é necessário que haja contato entre a Terra e o corpo. Essa força atrativa entre os corpos e a Terra é a força gravitacional (uma força de campo).

O conceito de campo introduzido inicialmente por Michel Faraday³ foi bastante útil na compreensão dos estudos das forças de ação à distância. Segundo ROCHA

³ Michael Faraday, físico do século XIX, achou conveniente representar os campos elétricos através de linhas de força, cuja construção é bastante simples.

(2009), campo é uma propriedade física que se estende por uma região do espaço e é descrita por uma função da posição e do tempo.

Faraday, após algumas experiências definiu as linhas de campo ou de forças pela análise de como as limalhas de ferro se alinhavam perto de um imã:

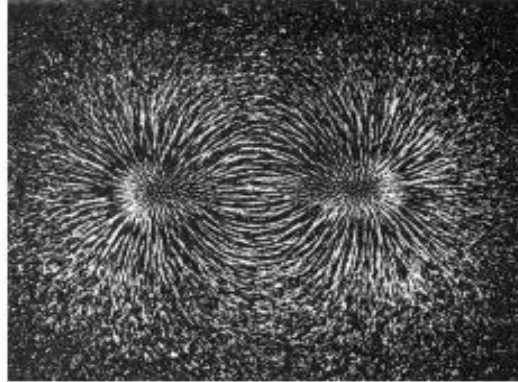


Figura 3.1: Visualização das limalhas de ferro que se alinham para indicar a forma aproximada das linhas de força do campo elétrico de um imã.

Conforme ROCHA (2009), “Faraday ‘percebeu no meio, um estado de tensão””. Ele deduziu que o imã expandia algum tipo de força através do espaço ao seu redor, criando uma tensão. Essa "tensão" no espaço ao redor do imã é o que faz com que as limalhas de ferro se alinhem.

Podemos dizer que tanto a gravidade quanto as forças elétricas exercem algum tipo de tensão em sua vizinhança. E ambos têm sua ação dependente do inverso do quadrado da distância. No entanto, o campo gravitacional é sempre atrativo, ao passo que o elétrico pode ser atrativo (cargas de sinais diferentes) ou repulsivo (cargas do mesmo sinais). Por esta razão utilizamos outra representação de campo gravitacional.

Note que as linhas de campo magnético e campo elétrico emanam radialmente em todas as direções. Na Fig. 3.2 as linhas de força apontam sempre para o centro da Terra, visto que a força gravitacional é sempre atrativa. Já na Fig. 3.3 as linhas de campo de uma carga pontual positiva apontam radialmente para fora dela. Caso a carga fosse negativa, as suas linhas de campo teriam comportamento semelhantes às linhas de campo gravitacional terrestre, como se vê na da figura 3.2.

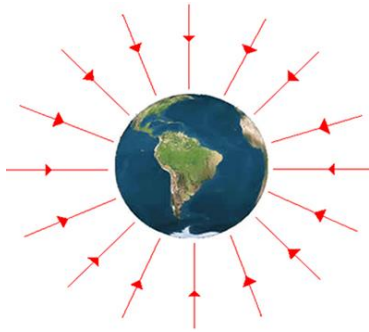


Figura 3.2: Linhas de campo gravitacional

Fonte: Silva (2015).

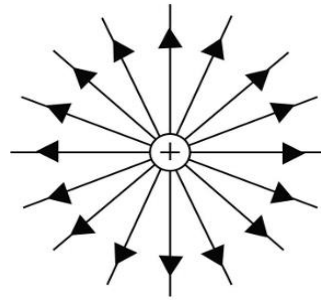


Figura 3.3: Linhas de campo elétrico para uma carga pontual positiva

Fonte: Helerbrock (2010).

A massa, assim como a carga elétrica é cercada por um campo de tensão sobre outras massas (campo gravitacional). Quanto mais próximas estiverem desenhadas as linhas de força em uma região do espaço, maior é o módulo do campo naquela região. Em regiões próximas da superfície, o campo é mais intenso. E em regiões afastadas da superfície, onde o campo gravitacional é mais fraco, as linhas devem estar mais distantes umas das outras.

A intensidade do campo gravitacional em uma dada região do espaço pode ser encarada de forma análoga ao campo elétrico. Quando uma pequena carga negativa é colocada em um ponto no espaço próximo a uma carga elétrica positiva, geradora de campo elétrico, a carga negativa sofre a ação de uma força elétrica atrativa. O mesmo ocorre com o campo gerado pela Terra. Corpos com massa relativamente grande (Terra) produz um campo que se manifesta sobre corpos menores através de uma força gravitacional.

Considere uma partícula com dimensões desprezíveis em relação à Terra, localizada no ponto P pelo vetor posição \vec{r} ilustrado na Fig. 3.4.

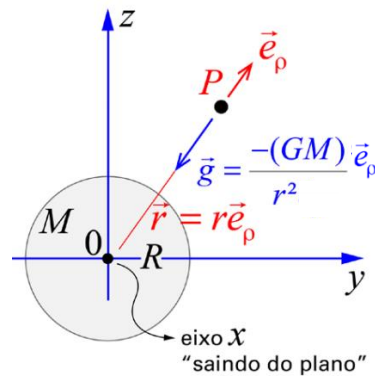


Figura 3.4: Esquema representativo de uma partícula sob a ação de um campo gravitacional.
Fonte: Marques (2015).

Essa partícula está sujeita a uma força, dada por:

$$\vec{F}(\vec{r}) = m\vec{g}(\vec{r}) = -m\left(\frac{GM}{r^2}\right)\vec{e}_\rho \quad 3.1$$

Em que $\vec{g}(\vec{r})$ representa o campo gravitacional produzido pela Terra sobre a partícula.

Quando colocamos uma partícula de prova no campo gravitacional da Terra, verificamos que atua sobre ela uma força que aponta para o centro do planeta. Desta maneira, define-se o campo gravitacional como sendo a razão entre a força e massa da partícula:

$$\vec{g}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{m} \quad 3.2$$

De acordo com MARQUES (2015), trata-se de uma definição que nos leva a determinação empírica de um campo gravitacional mais simples. Uma forma mais sofisticada de expressar a intensidade do campo gravitacional é a partir do potencial gravitacional como se vê na equação 3.3.

$$\vec{g}(\vec{r}) = -\nabla V(\vec{r}) = -\frac{\partial V}{\partial x}\hat{i} - \frac{\partial V}{\partial y}\hat{j} - \frac{\partial V}{\partial z}\hat{k} \quad 3.3$$

A Eq. 3.1 não se constitui a única equação de campo gravitacional: outras equações foram propostas por Einstein em sua Teoria da Relatividade Geral. Na Relatividade Geral, pensamos na interação gravitacional não como força de atração que surge entre todos os corpos que possuem massa, mas como resultante da

curvatura na estrutura do espaço-tempo. Uma discussão mais detalhada sobre o espaço-tempo e a Teoria da Relatividade Geral será realizada no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4 - A TEORIA MODERNA DA GRAVITAÇÃO

Segundo PEREIRA (2000), apesar da teoria de Newton ter tido um sucesso extraordinário, explicando muitos fatos e mesmo prevendo fatos novos, ela não é uma teoria correta da gravitação. Ela falha na explicação de vários fenômenos e alguns de seus insucessos fizeram com que Einstein propusesse uma nova teoria da gravidade.

No início do século XX, muitos fatos teóricos estavam inconsistentes com dados experimentais, indicando a imprecisão da gravidade de Newton.

Na Mecânica newtoniana uma força pode acelerar uma partícula a velocidade infinita, enquanto que na Relatividade, a velocidade limite é c . Uma outra dificuldade com a Mecânica Clássica é que ela admite forças de ação a distância, enquanto isso exige que as forças de ação e reação sejam iguais. Tal igualdade de ação e reação não tem sentido na Relatividade, exceto para forças de contato, porque a simultaneidade de eventos separados é relativa (RESNICK, 1971).

Em 1905, Einstein propôs sua Teoria da Relatividade Restrita (TRR), resultado da generalização e síntese da Mecânica Clássica de Newton com a Eletrodinâmica de Maxwell.

A Teoria da Relatividade Restrita postula que:

1. Postulado da relatividade: As leis da física têm a mesma forma em todos os referenciais inerciais.
2. Postulado da constância da velocidade da luz: A velocidade da luz é sempre a mesma, independentemente do referencial inercial no qual é medido (GAZZINELLI, 2009).

Além disso, a TRR implica que o espaço e o tempo estão interligados a um grau nunca antes imaginado; mudando completamente os conceitos de espaço e tempo da Mecânica Clássica.

De acordo com a teoria da gravidade de Newton a força gravitacional ocorre à longo alcance: age instantaneamente à qualquer distância. Essa natureza instantânea da ação é inconsistente com a TRR, pois, viola o segundo postulado que pressupõe

que nenhuma informação pode ser transmitida mais rápida que a velocidade da luz no vácuo. Portanto, como poderia a força gravitacional agir de forma instantânea, quando até mesmo a velocidade da luz demora certo tempo para se propagar no Espaço?

Todavia, a relatividade restrita não conseguia explicar a gravidade, visto que, assim como a Mecânica newtoniana, descreve apenas sistemas de referenciais inerciais. Segundo EINSTEIN (1999, p. 81), a Teoria da Relatividade Restrita refere-se a regiões galileanas, isto é, a regiões onde não existe campo gravitacional. Ou seja, a TRR, refere-se a sistemas físicos com velocidades próximas da velocidade da luz, mas não leva em conta o campo gravitacional.

Além disso, as leis da natureza eram consideradas válidas no que diz respeito, apenas, aos sistemas de referencial inercial, isto é, sistemas em movimento retilíneo e uniforme ou em repouso. De acordo com PEDUZZI (2009, p. 178), Einstein percebe com clareza que todas as leis naturais podiam ser discutidas no referencial da relatividade, exceto a gravitação newtoniana. Nesse caso, surge um problema: construir uma teoria física mais geral, na qual as leis da natureza seriam válidas para qualquer sistema de referencial, e não apenas inerciais.

Einstein começou a estudar estas questões e a tentar expandir a relatividade especial para incluir a gravidade. Seu primeiro passo foi fazer uma revisão crítica de um fato, bem conhecido da Física Clássica: o conceito da equivalência entre massa inercial e massa gravitacional. A igualdade no valor de ambas as massas, a priori, é um fato que foi comprovado por Newton experimentalmente com o pêndulo simples. E que “em 1909, Loránd Eotvos⁴ aumentou a precisão dessa igualdade com a balança de torção” (YAMAMOTO e FULKE, 2010, p. 241).

O segundo passo veio, quando Einstein introduziu à Teoria da Relatividade à geometria não euclidiana desenvolvida pelo matemático alemão Bernhard Riemann.

Com a geometria de Riemann, Einstein pode desenvolver as equações que descrevem o espaço curvo dependentes do tempo, ou seja, as equações do

⁴ No final do Séc. XIX, Loránd Eötvös verificou a equivalência das massas gravitacional e inercial com uma sensibilidade de 10^{-8} utilizando um aparato de balança de torção; um resultado bastante impressionante dada a época de realização do experimento. (ACEVEDO, MORAIS e PIMENTEL, 2019)

espaçotempo. Agora conhecidas como equações de campo de Einstein, que foram publicadas em 1916 em substituição a lei de Newton da Gravitação Universal.

4.1 O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

Na Mecânica Clássica, existem dois conceitos de massa: o primeiro diz respeito ao Princípio da Dinâmica de Newton e o segundo à Teoria da Gravitação Universal. De acordo com FALCIANO, (2010) “a massa inercial é definida como a constante de proporcionalidade entre a força exercida sobre um corpo e a aceleração que ele adquiriu ao sofrer esta força.” Enquanto que, a “massa gravitacional nos fornece a intensidade da interação gravitacional de um corpo com um campo gravitacional.”

O princípio da equivalência foi utilizado por Einstein como ponto de partida para a elaboração da TRG. Esse princípio é derivado da própria teoria newtoniana, porém, foi Einstein quem lhe deu um sentido mais amplo (GIACOMELLI e PÉREZ, 2019, p. 65).

A Teoria da Relatividade Geral contempla eventos ocorridos entre referenciais acelerados ou não. Desta forma, a TRR pode de certa forma ser encarada como um caso particular da TRG, visto que a relatividade restrita se limita a eventos ocorridos em referencias não acelerados (inerciais).

De fato, não é intuitivo perceber a igualdade entre as duas medidas de massas. No entanto, segundo as descrições experimentais de Galileu, e posteriormente as de Newton, nos estudos dos movimentos dos corpos, essas massas podem ser tomadas iguais entre si.

Einstein estava buscando generalizar o princípio da relatividade quando teve, em 1907, o que ele chamou de "o pensamento mais feliz da minha vida":

Eu estava sentado em uma cadeira, na repartição de patentes em Berna, quando subitamente me ocorreu um pensamento: “se um homem cai livremente, não sente o próprio peso.” Fiquei abismado. Essa experiência simples de pensamento exerceu uma impressão profunda sobre mim. Ela me conduziu à teoria da gravitação (EINSTEIN, 1982, p. 45-47).

O princípio da equivalência nos diz que existe uma igualdade entre as massas gravitacionais e inerciais de uma partícula, fato que levou Einstein à sua famosa experiência de pensamento (o elevador de Einstein).

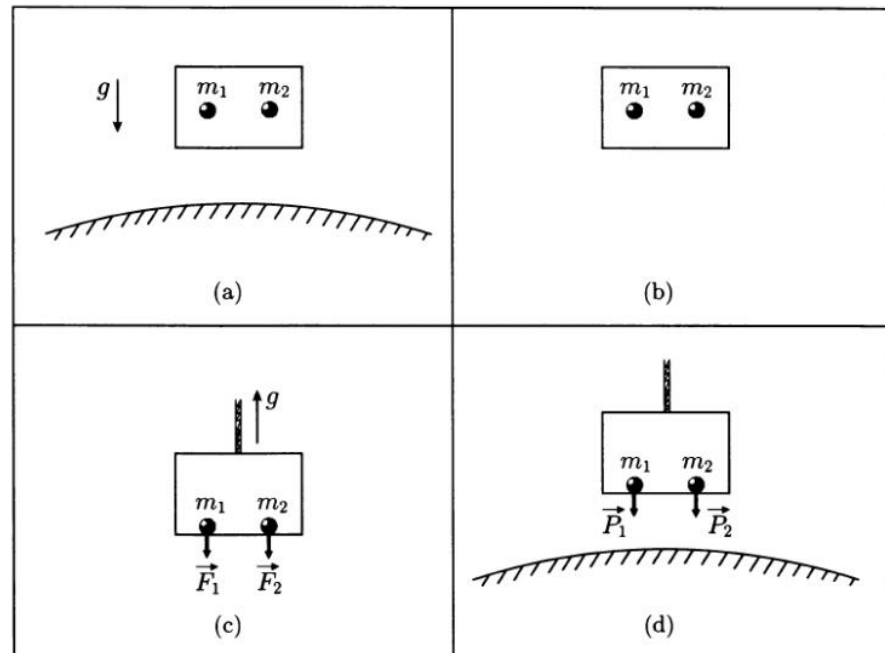


Figura 4.1: De acordo com o Princípio da Equivalência o observador em um elevador não pode distinguir se ele está em queda livre no campo gravitacional da Terra (a), em repouso na superfície da Terra (b), em um elevador acelerado (c) ou em um campo gravitacional (d).

Fonte: HENRIQUES, 2009.

O experimento mental consiste em imaginar as seguintes situações: um observador no interior de um elevador fechado que cai livremente em direção ao chão sob a ação do campo gravitacional da Terra Fig. 4.1a. O observador dentro deste elevador se sentirá sem peso, começará flutuar e, se este soltar objetos de massas diferentes (m_1 e m_2) dentro da cabine perceberá que os objetos também permaneceram flutuando ao seu redor.

O que impressiona é que o mesmo acontece quando o observador está dentro do elevador parado no espaço vazio, longe de qualquer ação da gravidade Fig. 4.1b. O observador não sentirá o peso de seu corpo, como acontece com os astronautas no espaço. O observador e os objetos (m_1 e m_2), assim, como os astronautas também flutuariam. Isto é, o observador não pode distinguir, em seu quadro de referência, se está flutuando no espaço vazio ou em queda livre no campo gravitacional da Terra.

No caso Fig. 4.1d, o elevador está parado na superfície da Terra e, o observador sente seu peso usual. Ele percebe que ao soltar os objetos (m_1 e m_2) eles irão cair aceleradamente em direção ao chão.

Mas, o observador experimentará a mesma sensação se estiver dentro de um elevador acelerado Fig. 4.1c, que se move para o espaço com uma aceleração exatamente igual à aceleração da gravidade, o observador sentirá novamente que os objetos (m_1 e m_2) caem no chão com a mesma aceleração.

A situação em que o elevador é acelerado pode ser descrita da seguinte maneira:

Suponhamos que, depois de nossa viagem horrorosa em queda livre, o sistema de freios de emergência do elevador tenha entrado em operação e conseguiram estacionar a cabine. Em sua parada, nós, que parecíamos flutuar no ar, despencamos de volta no chão. Agora podemos sentir a força de gravidade da Terra (NOGUEIRA, 2017).

Quando o elevador sobe, ele se move com aceleração, o que aumenta a aceleração da gravidade no referencial não inercial associado ao elevador, e o observador tem a sensação de seu peso estar aumentando. No entanto, assim que o elevador mantém a velocidade constante, ele começa a se mover uniformemente, o aparente ganho de peso desaparece e seu peso retorna ao normal.

Estes exemplos mostram que se pode “trocar referenciais acelerados por referenciais num campo gravitacional, ou vice-versa, ou seja, a aceleração perde o seu caráter absoluto” (HENRIQUES, 2015, p. 6).

Em outras palavras, o campo gravitacional (no qual a massa gravitacional se manifesta) é equivalente ao movimento acelerado (no qual a massa inercial se manifesta). Assim, Einstein chegou ao princípio da equivalência. É importante salientar que este princípio de equivalência é válido apenas em um espaço pequeno, onde a força da gravidade pode ser considerada constante.

Einstein continuou seu experimento mental (o observador no interior do elevador) questionando-se, agora, a respeito da trajetória de um feixe de luz: e se um raio de luz for emitido através de um pequeno buraco na parede de um elevador? O que acontecerá com a trajetória da luz quando o elevador se encontrar no espaço

vazio? Será esse caminho o mesmo quando o elevador estiver sob a ação de um campo gravitacional ou sendo acelerado?

Se o elevador estiver no espaço vazio Fig. 4.2a, o feixe luminoso atingirá a parede oposta exatamente na mesma altura que o buraco. O observador verá o raio luminoso seguir sua trajetória em linha reta. No entanto, quando o elevador se encontra no campo gravitacional da Terra, Fig. 4.2b, ou sendo acelerado, Fig. 4.2c, o raio de luz atinge um ponto abaixo da altura do buraco no qual incidiu: para o observador nesta situação o caminho do raio parecerá curvo.

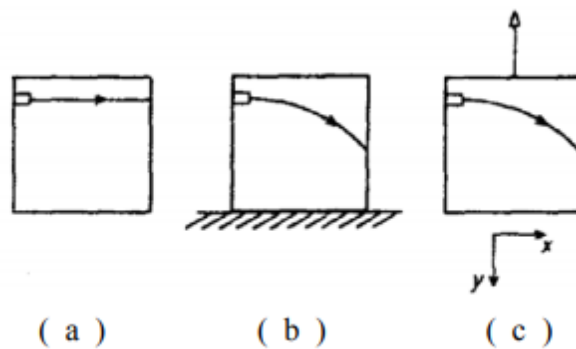


Figura 4.2: A trajetória de um feixe luminoso em um referencial inercial (a), no campo gravitacional da Terra (b) e no referencial acelerado (c).

Fonte: PEDUZZI, 2009.

A trajetória do feixe luminoso de uma parede à outra, do elevador, será curva. Com base nesses resultados Einstein chegou a uma conclusão surpreendente: o campo gravitacional curva a luz. Ele percebeu que não só a trajetória da luz é curva, mas o próprio espaçotempo em que a luz se move é curvado.

Se o leitor examinar a experiência com atenção, verá que a única hipótese necessária para que o encurvamento da trajetória da luz ocorra é que a luz tenha uma velocidade finita. É óbvio, pela argumentação usada, que qualquer outro fenômeno que se propague com velocidade finita num referencial inercial, na presença do campo gravitacional, será forçado pela gravidade a percorrer uma trajetória curva (GAZZINELLI, 2009, p. 130).

E isso, por sua vez, transforma a gravidade em algo completamente diferente de uma mera força. Mas o que seria?

Somos levados a concluir que a experiência mostra não uma propriedade da luz, mas, antes, uma propriedade do espaço na presença de um campo gravitacional. Imagine que o espaço se curve nas proximidades de uma massa; então, a trajetória reta característica de um fenômeno qualquer, por

exemplo, um raio de luz encurvar-se-á naturalmente nessa região (GAZZINELLI, 2009, p. 130).

Após seu experimento mental, “em que Einstein usa a ideia da geometria do espaçotempo para explicar a gravitação” (MAIA, 2009).

A nova teoria muda completamente as antigas ideias sobre o espaço e tempo. Contudo, a ideia de espaços curvos e geometrias não euclidianas necessitavam de um novo aparato matemático que Einstein ainda não dominava. Mas, felizmente, essas formas de geometrias já haviam sido formuladas por alguns matemáticos do século XIX, entre eles Georg Friedrich Bernhard Riemann ⁵ (LUZ e ÁLVARES, 2013).

4.2 GEOMETRIA NÃO EUCLIDIANA

Como vimos na seção 4.0, a Teoria da Relatividade Geral vai muito além da Relatividade Restrita e da Teoria da Gravitação Universal. Em particular ela nos dá uma nova interpretação para a gravidade. A Teoria da Relatividade Geral é construída diretamente sobre a ideia de espaço não euclidiano.

Na Física Clássica o modelo de um universo infinito com geometria euclidiana dominava. Aprendemos, desde muito cedo em nosso desenvolvimento intelectual relacionado à geometria euclidiana, que a soma dos ângulos internos de um triângulo é 180° . Trata-se de triângulos planos Fig. 4.3c.

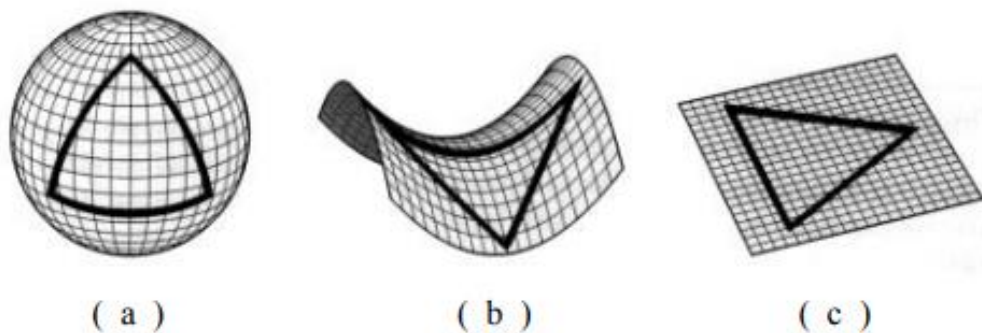


Figura 4.3: A trajetória de um feixe luminoso em um referencial inercial (a), no campo gravitacional da Terra (b) e no referencial acelerado (c).

Fonte: PEDUZZI (2009).

⁵ O matemático alemão Georg Friedrich Bernhard Riemann criou a Geometria riemanniana, com as ferramentas matemáticas necessárias ao tratamento dos espaços curvos, a qual foi essencial na elaboração da Teoria Geral da Relatividade. (LUZ e ÁLVARES, 2013)

Mas, pensemos em triângulos diferentes: triângulos traçados sobre uma superfície esférica ou sobre uma superfície como a sela de um cavalo. Na Fig.4.3a os triângulos traçados sobre uma superfície esférica (uma bola, por exemplo) são definidos como triângulos esféricos; e sobre uma superfície do tipo “sela de um cavalo” os triângulos são referidos como triângulos hiperbólicos (Fig. 4.3b).

Note no caso de um triângulo esférico que a soma dos ângulos internos é maior que 180° ; já para os triângulos hiperbólicos, todos os ângulos internos são agudos e menores que 60° , isto é, a soma dos ângulos internos de um triângulo hiperbólico é menor do que 180° . Temos nestes casos, geometrias não euclidianas.

O modelo revolucionário da geometria do universo foi proposto por Einstein, que no âmbito do desenvolvimento da TRG veio a compreender a curvatura do espaçotempo dentro do campo gravitacional.

Einstein, após vários anos de estudos, propõe uma interpretação inovadora para a gravidade considerando que a mesma estivesse sobre uma geometria não euclidiana. Segundo ZIEBELL (2014), a ideia central da Teoria da Relatividade Geral de Einstein era que a presença de massa curva o espaço (e afeta o tempo, de modo que a descrição é feita de forma conjunta, usando o chamado espaçotempo), e por outro lado as massas se deslocam no espaço segundo trajetórias que são afetadas pela curvatura do espaço.

Admita uma região bidimensional no espaço vazio onde duas partículas, A e B, estão em movimento retilíneo uniforme, ou seja, sem ação de forças agindo sobre eles. Se a resultante das forças é nula, a Mecânica Clássica e a Teoria da Relatividade estão de acordo. E, neste caso, os corpos se movem com velocidades constantes ao longo do espaço (Figura 4.4).

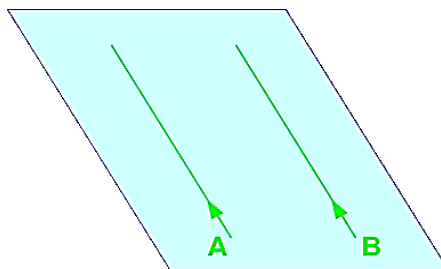


Figura 4.4: Duas partículas em MRU visto sobre um plano bidimensional.

Fonte: Einstein's geometric gravity (2000).

Conforme PEREIRA (2000), duas linhas retas, inicialmente paralelas, nunca se cruzam sobre uma superfície plana, por exemplo, em uma pequena região na Terra. Segundo a Teoria Clássica, se em algum momento uma força atrativa começar agir sobre essas partículas, elas podem modificar suas trajetórias indo convergir em um ponto (Figura 4.5).

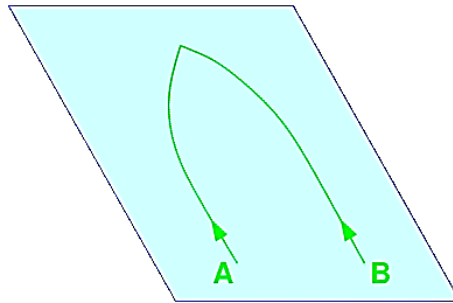


Figura 4.5: Duas partículas se movimentando sob a ação de uma força.
Fonte: Einstein's geometric gravity (2000).

Neste momento, as partículas A e B que estavam se movendo em linhas retas e paralelas são então aceleradas uma em direção à outra, em uma trajetória curva.

De acordo com CHIBENI (2013), na Teoria da Gravitação de Newton, a gravidade é uma força que poderia causar este efeito. O movimento da Lua ao redor da Terra, dos planetas ao redor do Sol, uma vez que são movimentos curvilíneos e acelerados. No entanto, iremos perceber que a razão pela qual as duas partículas se aceleram uma para a outra e depois se encontram não será resultado de uma força e sim de uma curvatura do espaço.

Imagine agora outra situação na qual duas pessoas A e B se movem na superfície de uma esfera, com as mesmas dimensões do planeta Terra (Figura 4.6).

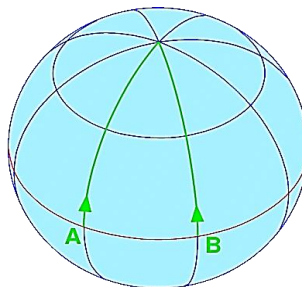


Figura 4.6: Dois corpos se movimentando em uma superfície curva.
Fonte: Einstein's geometric gravity (2000).

Considere que A e B saem da linha do equador em direções paralelas, com velocidades iguais e de mesmo sentido. Depois de certo tempo as trajetórias de A e B convergem em um dos polos. Note que as pessoas continuam se movendo em linha reta, no entanto, agora em uma superfície curva. Nesta situação duas linhas retas, inicialmente paralelas, se cruzarão sobre uma superfície curva tal como a superfície de uma esfera. Aqui temos a geometria de Riemann (PEREIRA, 2000).

“Entendo que não se movimentam em uma superfície plana, as pessoas atribuem o movimento relativo de aproximação à geometria desse ‘mundo’ não euclidiano, e não a algum tipo de força atrativa entre ambas, de natureza desconhecida” (PEDUZZI, 2009)

Podemos concluir que, no espaço vazio, onde não há meio material, os objetos devem se mover em linha reta. Mas imagine que o espaço não esteja vazio e os objetos não se movam em linha reta. Do ponto de vista da Relatividade Geral isso significa que o espaço-tempo é curvo perto de um objeto muito massivo. Todavia, essa curvatura é muito pequena perto da Terra, por isso temos a sensação de estarmos em um espaço plano.

Nessa situação, de acordo com a nova Teoria da Relatividade de Einstein, os corpos se movimentam seguindo um movimento geodésico que, no espaço curvo, consiste numa aparente trajetória retilínea, mas que na realidade se curva conforme as “dobraduras” do espaço-tempo.

“Podemos dizer que uma geodésica é a distância mais curta entre dois pontos. Ela será uma reta somente no caso em que a superfície em questão é um plano. Para todos os outros tipos de superfície haverá um tipo de curva específico que será a distância mais curta entre dois pontos selecionados” (MAIA, 2009).

De acordo com HERIVEL, (1956, p. 156), a gravidade na teoria de Newton é uma força ou poder capaz de impedir ou mudar a continuação dos corpos em seus estados. Na Teoria da Relatividade Geral de Einstein, a gravidade é uma deformação, uma curvatura do espaço-tempo. As partículas ainda seguem os caminhos mais retos possíveis naquele espaço-tempo, mas como o espaço-tempo está agora distorcido, mesmo naqueles caminhos mais retos as partículas se aceleram como se estivessem sob a influência do que Newton chamou de força gravitacional.

4.3 A GRAVIDADE COMO A CURVATURA NO ESPAÇOTEMPO

No momento precisamos apenas imaginar como se o universo fosse um tecido elástico bem esticado (de forma que se faça uma superfície plana, uma espécie de trampolim). Sobre ele coloca-se uma bola de boliche; o peso da bola deformará a superfície em torno dela formando uma cavidade. Uma bola de gude colocada próxima à deformação criada pela bola de boliche cairia em direção a ela.

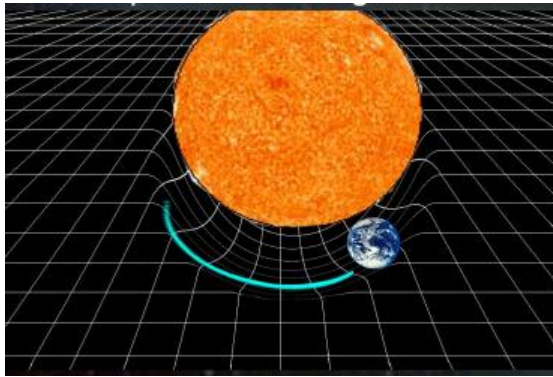


Figura 4.7: Esquema representativo da interação partícula de prova com o espaço-tempo curvo.

Fonte: Falciano (2013).

Os corpos que estiverem mais longe da curvatura do tecido não seriam atraídos, pois estariam fora do campo gerado pela bola de boliche.

A equação do campo de Einstein descreve como o espaço-tempo se curva pela matéria e, reciprocamente, como a matéria é influenciada pela curvatura do espaço-tempo, ou digamos, como a curvatura dá lugar à gravidade.

A equação do campo se apresenta como se segue:

$$G_{ab} = \frac{8\pi G_N}{c^2} T_{ab} \quad 4.1$$

Onde G_{ab} é a curvatura de Einstein, T_{ab} é o tensor de momento-energia e G_N é a constante gravitacional de Newton.

O tensor da curvatura de Einstein se pode escrever como:

$$G_{ab} = R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R + \Lambda g_{ab} \quad 4.2$$

No qual R_{ab} é chamado Tensor de Ricci, R é chamado escalar de curvatura e Λ é a constante cosmológica (ignorada em muitos casos).

$$R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R + \Lambda g_{ab} = \frac{8\pi G_N}{c^2}T_{ab} \quad 4.3$$

A Eq. 4.3 é a famosa expressão matemática da equação relativística do Campo Gravitacional, a base da Teoria da Relatividade Geral: Einstein admite que em um limite de campo fraco onde o espaçotempo é aproximadamente plano esta equação recai na descrição newtoniana da gravitação, isto é, a Teoria da Relatividade Geral satisfaz o Princípio da correspondência.

As equações de campo da Relatividade Geral encaram a gravidade como sendo originada pelo efeito da curvatura do espaço, provocada pela massa dos objetos e não mais, como sendo, da ação atrativa à distância, ocasionada pela massa de corpos.

A Teoria da Relatividade Geral diz que a gravidade não é uma simples força atrativa entre corpos que possuem massa, mas que ela é uma consequência direta da curvatura do espaçotempo causada pela presença de massa ou energia.

Essa nova ideia a respeito da gravidade pode ser explicada da seguinte maneira: quanto maior a massa de um corpo, mais ele curvará o espaçotempo e quanto maior essa distorção, maior será o desvio das trajetórias de corpos com massas menores que estiverem ao seu redor. Podemos dizer que enquanto a matéria diz ao espaço como se curvar, o espaço reage de volta e diz à matéria como se mover (MAIA, 2009).

Um corpo pesado, por exemplo o Sol, deforma muito o espaçotempo e, conseqüentemente, gera um campo gravitacional que faz com que a Terra e os outros planetas permaneçam em órbita ao seu redor.

Essa é uma maneira de tentar imaginar a curvatura do espaço devido à gravitação. O importante é sabermos que esta visualização não está correta, mas ajuda. O problema com esta técnica é que ela ainda faz uma analogia com uma superfície bidimensional para o universo quadridimensional (MAIA, 2009).

Imagine que o universo fosse um lençol esticado. Se uma bola pesada for colocada no centro do lençol, ela provocará uma curvatura como na figura 4.8.

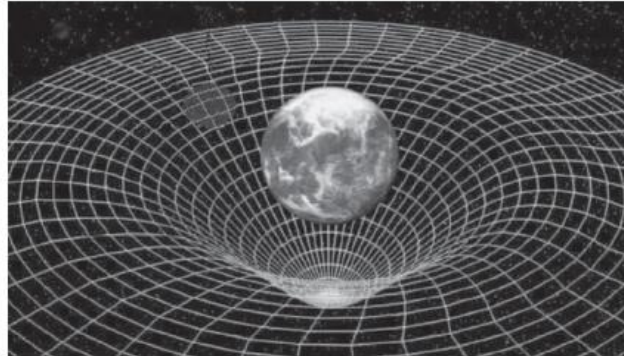


Figura 4.8: O espaço tempo sendo curvado pela presença da massa de um corpo.

Fonte: JORGE e BERNARDES (2000).

Quando uma bolinha de gude é colocada na proximidade da região do “buraco” criado pela bola pesada, ou seja, na região de influência, ela será acelerada e cairá em direção a ela. A bolinha com massa pequena não é “atraída” pela massa da bola pesada, mas sim, pela deformação que sua massa provoca no tecido do espaço

JORGE e BERNARDES (2000), como se vê na figura 4.9.

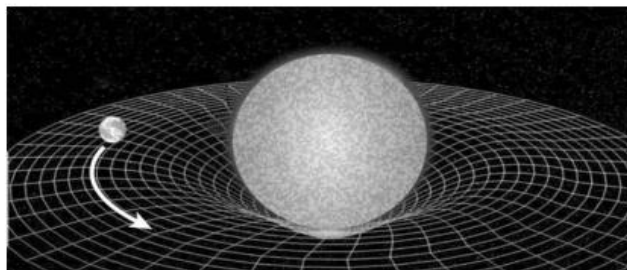


Figura 4.9: Modelo esquemático da Terra em órbita ao redor do Sol devido a deformação do espaço tempo.

Fonte: JORGE e BERNARDES (2000).

Einstein sugeriu que o mesmo acontece como na analogia anterior. A Terra gira em torno do Sol da mesma forma que a bolinha com massa pequena gira ao redor da bola de maior massa. De acordo com a Teoria da Relatividade Geral, a presença de um corpo maciço deforma o "espaço-tempo" e é essa deformação que atrai os corpos entre eles.

É como se a gravidade fosse realmente uma força de atração entre os corpos, exatamente como Newton descreveu na Teoria da Gravitação Universal: o Sol atrai a

Terra, porque a força gravitacional do Sol faz com que a Terra e todos os planetas que compõem o sistema solar se sintam atraídos para ele, e orbitam em torno dele executando seus movimentos de rotação. De acordo com Newton, se não houvesse essa força, o planeta iria se mover em linha reta, e sairia de órbita. Essa teoria da gravidade de Newton foi fortemente incorporada na prática. Mas, na verdade, o que acontece é que a enorme massa do Sol distorce o espaço ao redor, e esse espaço curvo empurra a Terra em direção ao Sol.

No entanto, é importante perceber que é difícil verificar a Teoria Geral da Relatividade, pois as teorias de Newton e Einstein dão praticamente os mesmos resultados na grande maioria das observações astronômicas e experimentos de laboratório. De fato em condições normais, onde a gravidade é fraca, ou seja, onde não há uma grande concentração de massa, os resultados são os mesmos em todos os fenômenos.

Na verdade, os resultados previstos pela TRG diferem acentuadamente dos resultados previstos pelas leis de Newton apenas na presença de campos gravitacionais superpesados. Isso significa que, para testar totalmente a Relatividade Geral, são necessárias medições muito precisas de objetos muito massivos ou buracos negros, aos quais nenhuma de nossas representações intuitivas usuais é aplicável. Até mesmo o Sol, com uma massa de $1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$, deforma o espaçotempo em proporções pequenas, por esta razão pode ser tão bem explicado pela Física Clássica.

Contudo, algumas experiências importantes foram realizadas, e seus resultados permitiram confirmar a Teoria da Relatividade Geral. Por exemplo, os desvios da órbita de Mercúrio que eram inexplicáveis do ponto de vista da Mecânica de Newton e a curvatura da luz das estrelas durante sua passagem pelo Sol.

CAPÍTULO 5 - APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

A aprendizagem mecânica é frequentemente criticada por fazer com que os estudantes obtenham os conteúdos de forma automática. Nela, os conteúdos que são normalmente memorizados ficam soltos e podem ser totalmente esquecidos. Por esta razão, utilizaremos outro tipo de aprendizagem que possibilita um momento de

reflexão e a construção de uma aprendizagem significativa aos moldes da teoria de David Ausubel⁶.

A ideia central da teoria aprendizagem significativa está relacionada com o fato de que os conhecimentos só podem ser adquiridos quando as novas informações estão ligadas aos conhecimentos prévios do indivíduo. Isto é, os novos conhecimentos interagem com os anteriores; não porque sejam iguais, mas porque estão associados a eles de uma maneira que cria um novo significado.

A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em conceitos ou proposições relevantes, preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Ausubel vê o armazenamento de informações no cérebro humano como sendo organizado, formando uma hierarquia conceitual, na qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados (e assimilados) a conceitos mais gerais, mais inclusivos. Estrutura cognitiva significativa, portanto, uma estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais do indivíduo (MOREIRA, 1999, p.95).

Na teoria da aprendizagem significativa os novos conceitos se relacionam com o conhecimento pré-existente, ao passo que o conhecimento prévio é reconfigurado pelo novo. Em outras palavras, nem o novo aprendido é literalmente adquirido na forma em que é apresentado, nem o conhecimento antigo permanece inalterado. Por sua vez, a assimilação de novas informações torna o conhecimento anterior mais estável e completo.

Esse tipo de aprendizagem acontece quando os novos conceitos são ancorados à estrutura cognitiva preexistente facilitando o aprendizado do aluno. A este conhecimento, especificamente relevante à nova aprendizagem, o qual pode ser, por exemplo, um símbolo já significativo, um conceito, uma proposição, um modelo mental, uma imagem, chamava de subsunçor ou ideia-âncora (MOREIRA, 2006).

Em Moreira (2006, p. 15), “um subsunçor é um conceito, uma ideia, uma proposição já existente na estrutura cognitiva, capaz de servir de “âncoradouro” a uma nova informação de modo que esta adquira, assim, significado para o indivíduo”. Ou seja, uma vez existindo um conjunto de ideias na estrutura cognitiva do indivíduo, com

⁶ David Ausubel (1918-2008) graduou-se em Psicologia e Medicina, doutorou-se em Psicologia do Desenvolvimento na Universidade de Columbia, onde foi professor no Teacher's College por muitos anos; dedicou sua vida acadêmica ao desenvolvimento de uma visão cognitiva à Psicologia Educacional.

as quais novas ideias podem se relacionar de maneira não-arbitrária estas novas ideias serão armazenadas por bastante tempo e de maneira estável.

5.1 UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

A Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) é uma sequência de ensino voltada à aprendizagem significativa de conceitos e tópicos específicos de um ou mais conteúdos escolares. A ideia central é que os materiais e recursos utilizados estejam voltados a uma aprendizagem significativa na perspectiva de David Ausubel.

Moreira (2011) elenca, nos fundamentos da UEPS, oito etapas descritas a seguir:

1. Definir o tópico específico a ser abordado, identificando a sua importância no contexto da matéria como um todo.
2. Criar/propor situação(ções) – discussão, questionário, mapa conceitual, situação-problema, etc. – que leve(m) o estudante a externalizar seu conhecimento prévio, aceito ou não, no contexto da matéria de ensino.
3. Propor situações-problema, em nível introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do estudante, preparando o terreno para a introdução do conhecimento. Estas situações-problema iniciais podem ser propostas através de simulações computacionais, demonstrações, vídeos, problemas do cotidiano, representações veiculadas pela mídia, problemas clássicos da matéria de ensino, etc. Mas sempre de modo acessível e problemático.
4. Uma vez trabalhadas as situações iniciais, apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva, isto é, começando com aspectos mais gerais, inclusivos, dando uma visão inicial do todo, mas sempre investigativa.
5. Em continuidade, retomar os aspectos mais gerais, estruturantes (aquilo que efetivamente se pretende ensinar), do conteúdo da unidade de ensino, porém em nível mais alto de complexidade

em relação à primeira apresentação e as situações-problema devem ser propostas em níveis crescentes de complexidade.

6. Concluindo a unidade, dar seguimento ao processo de diferenciação progressiva, retomando as características mais relevantes do conteúdo em questão, porém de uma perspectiva integradora, isso deve ser feito através de nova apresentação que pode ser através de exposição oral, leitura de texto, o uso de um recurso computacional, um audiovisual, etc. O importante não é a estratégia em si, mas o modo de trabalhar o conteúdo da unidade.
7. A avaliação da aprendizagem, através da UEPS, 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 após o sexto passo, na qual deverão ser propostas questões/situações que impliquem compreensão, que evidenciem captação de significados.
8. A UEPS somente será considerada exitosa, se a avaliação do desempenho dos estudantes fornecer evidências de aprendizagem significativa (captação de significados, compreensão, capacidade de explicar, de aplicar o conhecimento para resolver situações-problema). A aprendizagem significativa é progressiva, o domínio de um campo conceitual é progressivo. Por isso, a ênfase em evidências e não em comportamentos finais.

O capítulo 6 desse trabalho destina-se a apresentar uma UEPS para ensinar os conceitos clássicos e moderno da gravidade ao nível médio.

A elaboração dessa UEPS vem da necessidade de apresentar de forma didática e progressiva o conceito de gravidade segundo a TRG como sendo um aperfeiçoamento da lei da gravitação universal de Newton.

CAPÍTULO 6 - A UEPS “A GRAVIDADE NEWTONIANA E EINSTEINIANA NÃO É SÓ UMA DICOTOMIA CONCEITUAL”

A UEPS foi elaborada segundo os critérios estabelecidos por MOREIRA, (2011). Esta destina-se a auxiliar o professor de Física que queira ensinar os conceitos da gravidade através de um viés mais reflexivo e menos matemático.

A previsão para sua execução é de quatro encontros, cada encontro com uma duração de aproximadamente uma hora e meia.

6.1 SEQUÊNCIAS DE ENSINO

Para cada encontro, foi elaborada uma Sequência de Ensino, esta tinha como finalidade ora resgatar os subsunçores, ora ancorá-los com novos conhecimentos, a fim de que a apropriação do conceito de gravidade acontecesse de forma significativa.

6.1.1 SEQUÊNCIA DE ENSINO PARA O PRIMEIRO ENCONTRO

O primeiro encontro começa com discussões sobre a ideia intuitiva do que vem a ser gravidade. É interessante estabelecer uma conversa direta com os estudantes, na intenção de que eles exponham situações vivenciadas no cotidiano que envolvam a temática da aula. Assim, de maneira espontânea, eles apresentarão fenômenos e situações sobre a gravidade, além de expor suas dúvidas e incertezas, o que possibilita obter um levantamento sobre os subsunçores.

Esse primeiro momento tem duplo interesse. O primeiro é averiguar o nível de maturação que os estudantes têm sobre a gravidade; já o segundo se concentra em prepará-los para assistir o vídeo “**Além do Cosmos: O Espaço**” produzido pela *National Geographic*. Esse vídeo, bem como todo o material que pode ser usado durante a execução dessa UEPS está disponível no endereço:

<https://drive.google.com/drive/folders/1-5v4A4KLnV-DNJuW--dxoKdoDV73NJp?usp=sharing>

Após ser assistido o vídeo, o professor retoma a discussão. Agora, dando um tratamento mais formal e técnico ao conceito de gravidade, começando pela visão clássica e depois moderna. Esse momento é extremamente importante, pois, a partir

dele, é que se fundamentará toda a base para os encontros seguintes, assim como a metodologia usada durante as aulas.

Ao fim de cada aula, será aplicada uma atividade (via formulário do *Google Forms*) para os estudantes fazerem em casa. Desta forma, as aulas seguintes têm seu início, com a discussão sobre as respostas enviadas pelos estudantes. Essas atividades e as Sequências de Ensino podem ser encontradas no Apêndice A.

6.1.2 SEQUÊNCIA DE ENSINO PARA O SEGUNDO ENCONTRO

O segundo encontro é dedicado a apresentar aos estudantes a leis de Kepler e a lei da gravitação de Newton. Para cada lei de Kepler foi dado um prévio tratamento teórico e posteriormente usado um simulador. Os simuladores são ferramentas importantíssimas para uma melhor visualização, compreensão e apropriação de uma lei Física. Ingredientes essenciais para um ensino e aprendizagem significativa.

Após a apresentação das leis de Kepler, vem à lei da Gravitação Universal de Newton. A essa altura, acredita-se que os estudantes já tenham uma ideia bem madura da gravidade como sendo uma força de campo que atrai os corpos imersos em um espaço estático e indeformável.

A aula é findada com uma atividade para ser feita em sala (veja apêndice A).

6.1.3 SEQUÊNCIA DE ENSINO PARA O TERCEIRO ENCONTRO

Esse encontro é destinado a apresentação da gravidade ao olhos da Teoria da Relatividade Geral. Nessa aula, será retomada a ideia de espaço-tempo e da atração entre corpos ser decorrente da curvatura do espaço.

A aula se inicia com a apresentação do vídeo “**Teoria da gravidade segundo Albert Einstein**”. Esse vídeo foi exibido pela History Brasil, disponível em seu canal do Youtube – *The History Channel Brasil*.

Após a apresentação do vídeo, o professor começa a discussão sobre a ideia da atração entre corpos ser proveniente de uma deformação e não de uma força imaginária com acreditava Newton. Com o intuito de fazer o aluno “enxergar” entre o espaço deformado pelo Sol *verus* o espaço não deformado, são mostrados mais dois

vídeos curtos: ***Relatividade de Einstein - Se o Sol desaparecesse*** e ***Simulador do efeito gravitacional da contração do espaço***.

O professor retoma a palavra, a fim de mostrar que a diferença nas visões de Newton e Einstein vão bem além de uma simples mudança conceitual do entendimento sobre a gravidade. Isso porque, diferentemente da teoria newtoniana, a einsteiniana tem sua comprovação experimental difícil de ser obtida (essa fala na verdade é uma preparação para apresentar a comprovação da curvatura do espaço através do eclipse observado na cidade de Sobral no Ceará).

Feito os comentários, é então apresentado o vídeo “***100 anos do eclipse em Sobral Teoria da Relatividade Geral***”. Esse vídeo é apresentado pelo professor Tássio⁷ em seu canal do *Toutube* – *Tássio Explica*.

A aula é findada com o fechamento do tema pelo professor e com a proposta de uma atividade para ser feita em sala (veja apêndice A).

6.1.4 SEQUÊNCIA DE ENSINO PARA O QUARTO ENCONTRO

O quarto e último encontro deve ser dividido em dois momentos. O primeiro, destinado as considerações finais e a retirada de dúvidas acerca do tema. O segundo, por sua vez, deve ser o momento em que é dada a palavra mais diretamente aos estudantes, a fim de que eles avaliem a metodologia usada para ensinar a Teoria da Gravidade clássica e moderna, o quanto contribui o uso de vídeos e simuladores na melhoria do entendimento e por fim, o quanto esse conteúdo foi relevante para suas vidas não só como estudantes mais como cidadãos.

No apêndice está disponível um modelo de questionário que pode ser usado nessa última etapa.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO

Apresentamos neste trabalho o conceito da gravidade, que desempenhou um papel relevante na História, tanto da Mecânica newtoniana quanto na einsteiniana. Foi

⁷ Graduado em Física e Matemática e com Mestrado e Doutorado em Tecnologia Nuclear de Reatores.

na tentativa de descrevê-la teórica e matematicamente que Isaac Newton criou a Lei da Gravitação Universal. Essa lei motivou Albert Einstein a desenvolver a sua Teoria da Relatividade Geral.

Vimos ao longo do texto que o entendimento sobre a gravidade e sua influência no espaço foi totalmente modificada com o desenvolvimento da TRG. Classicamente a gravidade é uma entidade que não interfere no espaço, originando a atração entre massas. Ao passo que, para o conceito atual, ela é um agente decorrente da deformação na geometria do espaço sendo a origem da atração entre corpos. Essa deformação no espaço interfere segundo à TRG na contagem do tempo, pois relativisticamente não se pode dissociar espaço e tempo como quantidades distintas e independentes. Para a relatividade geral não existe espaço e tempo, mas sim, o espaçotempo.

Acreditamos que a UEPS aqui desenvolvida é um boa ferramenta didática que se propõe a apresentar a dicotomia conceitual entre as visões Clássica e Moderna da gravidade.

Como o viés dessa UEPS foi a abordagem conceitual, o uso de vídeos e simuladores que compõem essa unidade de ensino, podem proporcionar aos estudantes uma melhor visão e entendimento da temática abordada nesse trabalho, além do que, tais recursos são indispensáveis para a aprendizagem significativa desenvolvida por David Ausubel e Marcos A. Moreira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, O. A.; MORAIS, E.; PIMENTEL, B. M. **O Princípio de Equivalência**. São Paulo: Revista Brasileira de Ensino de Física, 2019.

CHIBENI, S. S. As posições de Newton, Locke e Berkeley sobre a natureza da gravitação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, 2013.

EINSTEIN, A. How I created the theory of relativity. **Physics Today**, v. 35, n. 8, fev. 1982.

EINSTEIN, A. **How I created the theory of relativity**. [S.l.]: [s.n.], v. 35, 1982b.

EINSTEIN, A. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Tradução de Carlos Almeida Pereira. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

FALCIANO, F. T. Geometria, espaço-tempo e gravitação: conexão entre conceitos da relatividade geral. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 4, fev. 2010.

FALCIANO, F. T. O espaço-tempo curvo na Teoria da Relatividade Geral. **cbpf.br**, 2013. Disponível em: <http://www.cbpf.br/~ftovar/images/Einstein_Espacotempo.pdf>. Acesso em: 25 maio 2019.

FERREIRA, J. S. P.; ALMEIDA, G.; GONDIM, M. K. V. Leis de Kepler e Gravitação Universal. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, 2015.

GALILELO, G. **Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo**. Torino: [s.n.], 1970.

GAZZINELLI, R. **Teoria da Relatividade Especial**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

GIACOMELLI, A. C.; PÉREZ, C. A. S. **Compreendendo a teoria da relatividade dos fundamentos às suas consequências**. [S.l.]: Universidade de Posso Fundo, 2019.

HELERBROCK, J. Campo Elétrico. **munodoeducacao**, 2010. Disponível em: <<https://munodoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/campo-eletrico.htm>>. Acesso em: 20 maio 2019.

HENRIQUES, A. B. **A Teoria da Relatividade Geral**. 2. ed. Lisboa: Press, 2015.

HERIVEL, J. **The Background to Newton's Principia: A study of Newton's dynamical**. Oxford: Clarendon Press, 1956.

HIODO, F. Y. **A forma e o campo de gravidade da Terra**. [S.l.]: [s.n.], 2009.

JORGE ; BERNARDES, E. Da Gravidade de Newton para o Espaço-tempo curvo de Einstein. **ifsc.usp**, 2000. Disponível em: <www.ifsc.usp.br/~FCM0101/guia.pdf>. Acesso em: 25 maio 2019.

LUZ, A. M. R.; ÁLVARES, B. A. **Física contexto e aplicações: ensino médio**. São Paulo: Scipione, 2013.

MAIA, N. B. **Introdução à Relatividade**. São Paulo: Livraria da Física, 2009.

MARQUES, G. C. Gravitação. In: CORPOS, D. D. M. D. **USP/Univesp**. [S.l.]: [s.n.], p. 368-369.

MARQUES, G. D. C. **Dinâmica do Movimento dos Corpos**. São Paulo: EUSP- Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (CEPA), 2015.

MOREIRA, M. A. Unidade de Ensino Potencialmente Significativa-UEPS. **Textos de Apoio ao Professor de Física**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011.

NEWTON, I. **Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural-Livro 1**. São Paulo: EUSP, 2012.

NOGUEIRA, S. **Einstein para entender de uma vez**. São Paulo: Abril, 2017.

PEDUZZI, L. O. **A relatividade Einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica**. Santa Catarina: [s.n.], 2009.

PEREIRA, A. R. GRAVITAÇÃO: DE NEWTON A EINSTEIN. **dpf**, 2000. Disponível em: <www.dpf.ufv.br/docs/gravclass.pdf>. Acesso em: 28 maio 2019.

PHYSICS, M. P. I. F. G. Einstein's geometric gravity. **einstein-online.info**, 2000. Disponível em: <<http://www.einstein-online.info/elementary/generalRT/GeomGravity.html>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

PRASS, A. R. Gravitação e Leis de Kepler. **fisica.net**, 2015. Disponível em: <<https://www.fisica.net/mecanicaclassica/gravitacao.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2019.

RESNICK, R. **Introdução à Relatividade Especial**. São Paulo: Polígono, 1971.

ROCHA, J. F. M. O conceito de "campo" em sala de aula- uma abordagem histórico-conceitual. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, 30 abril 2009.

ROCHA, J. F. M. **Origens e evoluções das ideias da Física**. Salvador: [s.n.], 2011.

SILVA, M. Campo gravitacional. **munodoeducacao**, 2015. Disponível em: <<https://munodoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/campo-gravitacional.htm>>. Acesso em: 28 maio 2019.

TORIBIO, A. M. **História da Física**. Vitória: UFES-Núcleo de Educação Aberta e a Distância, 2012.

YAMAMOTO, K.; FULKE, L. F. **Física Para o Ensino Médio**. [S.l.]: [s.n.], v. 3, 2010.

ZIEBELL, L. F. Força gravitacional ou curvatura do espaço-tempo? **if.ufrgs.br/novocref**, 2014. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=forca-gravitacional-ou-curvatura-do-espaco-tempo>>. Acesso em: 28 maio 2019.

APÊNDICE A

Nesse apêndice serão mostradas as atividades e as Sequências de Ensino desenvolvidas durante a elaboração da UEPS “*A gravidade newtoniana e einsteiniana não só uma dicotomia conceitual*”.

A-1 ATIVIDADES PARA SALA

ATIVIDADES PARA O PRIMEIRO ENCONTRO

Essa atividade pode ser respondida, acessando o link:

<https://forms.gle/zSER3hsZuM7RUUQK7>

- 1) A respeito do conceito de gravidade, assinale a alternativa correta.
 - a) A lei da atração gravitacional de Newton determina que a força gravitacional é inversamente proporcional ao produto das massas e diretamente proporcional ao quadrado da distância que separa dois corpos.
 - b) Tanto espaço quanto o tempo são curvados pela presença de um elemento massivo. Tal curvatura na malha espaçotempo proporciona o que denominamos de gravidade.
 - c) As curvaturas no espaçotempo só podem ser geradas por corpos que possuem massa tão grande quanto a massa do Sol.
 - d) A gravidade é resultado de uma curvatura gerada no espaço por causa da presença de uma força que age entre os corpos.

- 2) “A lei da gravidade é absoluta. Não adianta querer puxar quem quer descer. Demanda grande esforço para evitar, ou levantar quem quer ficar deitado, sentado, estático, gigantesco esforço exigirá. Só existe uma forma de contrapor essa lei, É o esforço próprio de não contentar-se em permanecer no lugar.” Marx Karter. A partir do texto e do conhecimento do que é gravidade, marque a alternativa correta.
 - a) Ao dizer que a lei da gravidade é absoluta, o autor propõe que essa força sempre atua da mesma forma, que é na vertical e para baixo.
 - b) Ao dizer que a lei da gravidade é absoluta, o autor propõe que essa força sempre atua da mesma forma, que é na vertical e para baixo.

- c) O fato de a lei da gravidade ser absoluta garante que em todo o lugar os corpos terão o mesmo peso.
- d) Todas as alternativas anteriores estão incorretas.
- 3) Do ponto de vista da Mecânica, a gravidade é a força de atração que surge entre dois corpos – Denominada Lei da Gravitação Universal. Assinale qual dos cientistas abaixo criou essa lei:
- a) Galileu Galilei
- b) Jonathas Kepler
- c) Tycho Brahe
- d) Issac Newton
- 4) Tanto a Teoria da Relatividade Especial quanto a Teoria da Relatividade Geral se utilizam do conceito de espaço e tempo. Nessas duas teorias, o tempo é visto com uma dimensão extra, além das três espaciais já conhecidas. O que, então, diferencia as duas teorias na maneira de conceber o espaço e tempo?

ATIVIDADES PARA O SEGUNDO ENCONTRO

Essa atividade pode ser respondida, acessando o link:

<https://forms.gle/5iSyRiQ65PXUdNpU7>

- 1) Por volta do século XVII, o físico Galileu Galilei através de um experimento, chegou à conclusão de que quando uma pedra e uma pena, desprezando a resistência do ar, são abandonados da mesma altura, ambos alcançam o solo no mesmo instante. Por que isso acontece?
 - a) Porque os corpos caem com velocidades diferentes.
 - b) Porque o tempo de queda dos corpos dependem de suas formas, não das suas massas.
 - c) Porque a aceleração da gravidade não depende da massa dos corpos.
 - d) Porque a altura com que os corpos caíram era muito pequena.

- 2) O astrônomo alemão J. Kepler (1571-1630), desenvolveu um trabalho de grande vulto, aperfeiçoando as ideias de Copérnico. Em consequência, ele conseguiu estabelecer três leis sobre o movimento dos planetas, que permitiram um grande avanço no estudo da Gravitação Universal de Newton. Um estudante ao ter tomado conhecimento das leis de Kepler concluiu, segundo as proposições a seguir, que:
 - I. Para a primeira lei de Kepler (lei das órbitas), o verão ocorre quando a Terra está mais próxima do Sol, e o inverno, quando ela está mais afastada.
 - II. Para a segunda lei de Kepler (lei das áreas), a velocidade de um planeta X, em sua órbita, diminui à medida que ele se afasta do Sol.
 - III. Para a terceira lei de Kepler (lei dos períodos), o período de rotação de um planeta em torno de seu eixo, é tanto maior quanto maior for seu período de revolução.

Com base na análise feita, assinale a alternativa correta:

- a) Apenas as proposições II e III são verdadeiras
 - b) Apenas as proposições I e II são verdadeiras
 - c) Apenas a proposição II é verdadeira
 - d) Apenas a proposição I é verdadeira
-
- 3) A lei da Gravitação Universal de Newton diz que:

- a) Os corpos se atraem na razão inversa de suas massas e na razão direta do quadrado de suas distâncias.
 - b) Os corpos se atraem na razão direta de suas massas e na razão inversa do quadrado de suas distâncias.
 - c) Os corpos se atraem na razão direta de suas massas e na razão inversa de suas distâncias.
 - d) Os corpos se atraem na razão inversa de suas massas e na razão direta de suas distâncias.
- 4) A força da atração gravitacional entre dois corpos celestes é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os dois corpos. Assim é que, quando a distância entre um cometa e o Sol diminui da metade, a força de atração exercida pelo Sol sobre o cometa:
- a) diminui da metade;
 - b) Permanece constante;
 - c) É dividida por 4;
 - d) É multiplicada por 4.
- 5) A intensidade da força gravitacional com que a Terra atrai a Lua é F . Se fossem duplicadas a massa da Terra e da Lua e se a distância que as separa fosse reduzida à metade, a nova força seria:
- a) $16F$
 - b) $8F$
 - c) $4F$
 - d) $2F$

ATIVIDADES PARA O TERCEIRO ENCONTRO

Essa atividade pode ser respondida, acessando o link:

<https://forms.gle/7UHRxBQsmfbn4Xfa8>

- 1) Em relação à Teoria da Relatividade Geral, marque o que estiver correto:
 - a) A teoria da relatividade geral aborda apenas fenômenos do ponto de vista não inercial.
 - b) A teoria da relatividade geral é uma segunda teoria feita por Einstein, na qual erros em relação à teoria da relatividade restrita foram corrigidos.
 - c) A teoria da relatividade geral estuda fenômenos em relação a referenciais não inerciais.
 - d) A teoria da relatividade geral foi desenvolvida na segunda metade do século XIX.

- 2) A teoria da Relatividade Geral, proposta por Albert Einstein (1879 – 1955) em 1905, revolucionou as ideias sobre a gravidade, e é válida não só para referenciais inerciais, mas também para referenciais não-inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, considere as seguintes afirmativas:

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

Assinale a alternativa correta:

- a) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
 - b) As afirmativas I e III são verdadeiras.
 - c) Apenas a afirmativas II é verdadeira.
 - d) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- 3) Observe as afirmações abaixo e assinale a alternativa CORRETA.
 - a) O Princípio de Equivalência diz que a massa inercial e gravitacional dos corpos são iguais.

- b) O experimento de Eötvös demonstrou esta equivalência e também que a ação do campo gravitacional depende do tipo de elemento do qual está constituído o corpo.
 - c) Princípio da equivalência: não é possível distinguir entre um campo gravitacional e um referencial inercial.
 - d) Um observador dentro de uma nave fechada (sem janelas) consegue distinguir de maneira intuitiva se estar parado na superfície da Terra , onde a aceleração é $9,8 \text{ m/s}^2$ ou no espaço sendo acelerado para cima a $9,8 \text{ m/s}^2$.
- 4) Com base na Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, publicada em 1915, analise as afirmações:
- I. Dois objetos exercem uma força de atração um sobre o outro, conhecida como “gravidade”.
 - II. O espaço e tempo estão entrelaçados em um único contínuo conhecido como espaçotempo.
 - III. A presença de matéria encurva o espaçotempo. Assim, quanto maior for a massa do corpo mais curvo será o espaço ao seu redor.

Quais estão corretas:

- a) I e II estão corretas
- b) I e III estão corretas
- c) II e III estão corretas
- d) Todas estão corretas

ATIVIDADES PARA O QUARTO ENCONTRO

Essa atividade pode ser respondida, acessando o link:

https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1zZ2Yef4GElIG8ZDGMJ_7T_QQPgXGoGol

CONSTRUINDO UM MAPA CONCEITUAL

Tendo concluído a explicação de todo o conteúdo da UEPS, é importante que os estudantes coloquem em prática seu aprendizado. Para tanto, os discentes deveram refletir novamente sobre a leitura e elaborar um mapa conceitual pontuando o que é a gravidade na visão newtoniana e einsteiniana.

DICAS DE COMO CONSTRUIR UM MAPA CONCEITUAL

1. Identifique os conceitos-chave do conteúdo que vai mapear e ponha-os em uma lista. Limite entre 6 e 10 o número de conceitos.

2. Ordene os conceitos, colocando o(s) mais geral(is), mais inclusivo(s), no topo do mapa e, gradualmente, vá agregando os demais até completar o diagrama de acordo com o princípio da diferenciação progressiva. Algumas vezes é difícil identificar os conceitos mais gerais, mais inclusivos; nesse caso é útil analisar o contexto no qual os conceitos estão sendo considerados ou ter uma ideia da situação em que tais conceitos devem ser ordenados.

3. Se o mapa se refere, por exemplo, a um parágrafo de um texto, o número de conceitos fica limitado pelo próprio parágrafo. Se o mapa incorpora também o seu conhecimento sobre o assunto, além do contido no texto, conceitos mais específicos podem ser incluídos no mapa.

4. Conecte os conceitos com linhas e rotule essas linhas com uma ou mais palavras-chave que explicitem a relação entre os conceitos. Os conceitos e as palavras-chave devem sugerir uma proposição que expresse o significado da relação.

5. Setas podem ser usadas quando se quer dar um sentido a uma relação. No entanto, o uso de muitas setas acaba por transformar o mapa conceitual em um diagrama de fluxo.

6. Evite palavras que apenas indiquem relações triviais entre os conceitos. Busque relações horizontais e cruzadas.

7. Exemplos podem ser agregados ao mapa, embaixo dos conceitos correspondentes. Em geral, os exemplos ficam na parte inferior do mapa.

8. Geralmente, o primeiro intento de mapa tem simetria pobre e alguns conceitos ou grupos de conceitos acabam mal situados em relação a outros que estão mais relacionados. Nesse caso, é útil reconstruir o mapa.

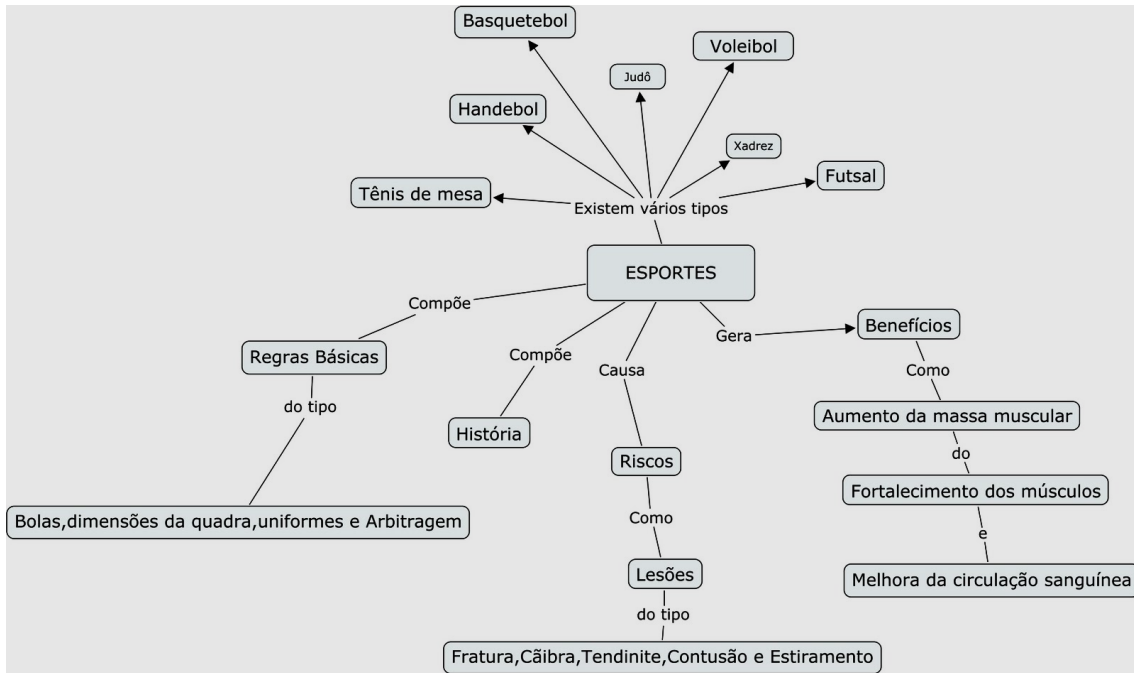
9. Talvez neste ponto você já comece a imaginar outras maneiras de fazer o mapa, outros modos de hierarquizar os conceitos. Lembre-se que não há um único modo de traçar um mapa conceitual. À medida que muda sua compreensão sobre as relações entre os conceitos, ou à medida que você aprende, seu mapa também muda. Um mapa conceitual é um instrumento dinâmico, refletindo a compreensão de quem o faz no momento em que o faz.

10. Não se preocupe com “começo, meio e fim”, o mapa conceitual é estrutural, não sequencial. O mapa deve refletir a estrutura conceitual hierárquica do que está mapeado.

11. Compartilhe seu mapa com colegas e examine os mapas deles. Pergunte o que significam as relações, questione a localização de certos conceitos, a inclusão de alguns que não lhe parecem importantes, a omissão de outros que você julga fundamentais. O mapa conceitual é um bom instrumento para compartilhar, trocar e “negociar” significados.

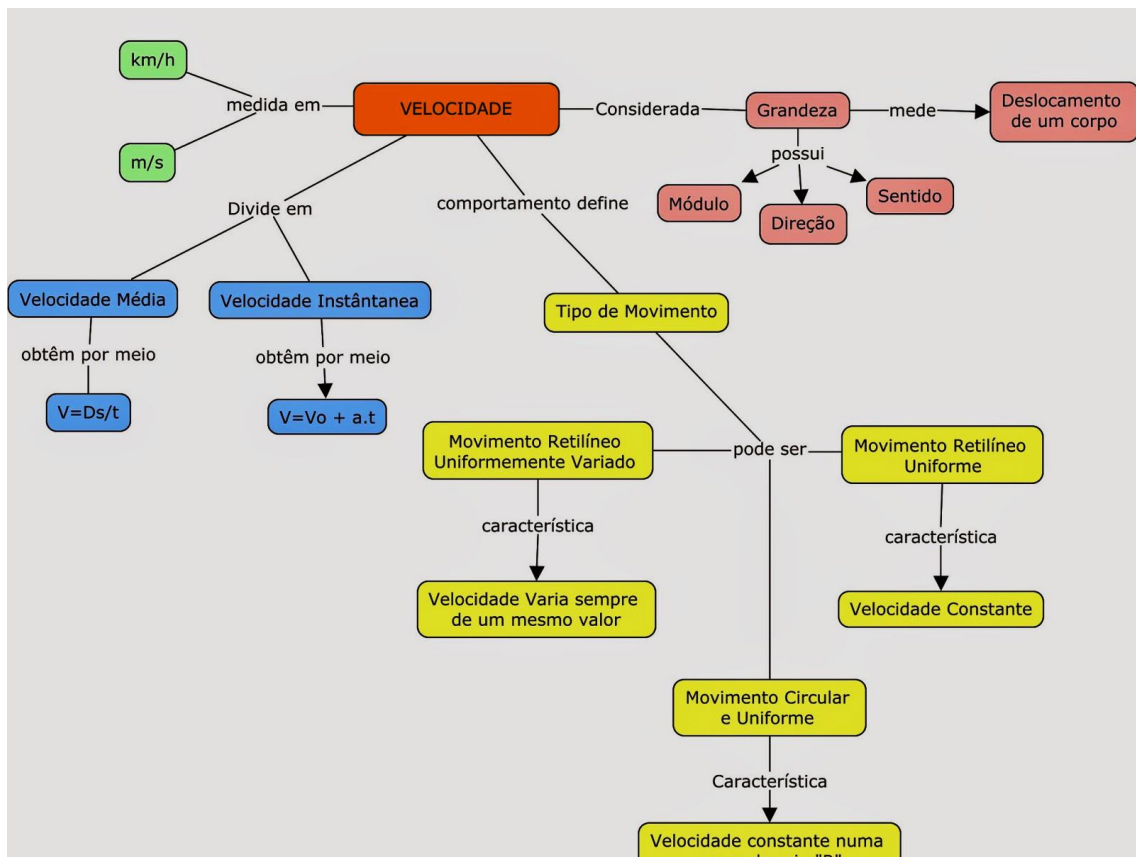
Veja como exemplo dois mapas conceitual. Um na temática de esportes e outro na temática de cinematográfica.

Figura 1 Mapa conceitual na temática de esportes.



Fonte: Oliveira (2011)

Figura 2 Mapa conceitual na temática de Cinemática.



Fonte: Santos (2014)

Essa atividade pode ser respondida, acessando o link:

<https://forms.gle/4EGwEx5UtcMC6F5n7>

QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA UPES

- 1) Os objetivos da UPES foram alcançados?
 SIM PARCIALMENTE NÃO
- 2) O conteúdo apresentado está relacionado com os objetivos colocados?
 SIM PARCIALMENTE NÃO
- 3) O conteúdo proposto foi cumprido?
 SIM PARCIALMENTE NÃO
- 4) Os vídeos e simulados utilizados durante as aulas ajudaram no entendimento dos conteúdos?
 SIM PARCIALMENTE NÃO
- 5) As atividades de aula e fora de aula foram consistentes?
 SIM PARCIALMENTE NÃO
- 6) Os métodos de avaliação conseguiram detectar se houve aprendizado?
 SIM PARCIALMENTE NÃO
- 7) Os métodos de avaliação são consistentes com os conteúdos apresentados?
 SIM PARCIALMENTE NÃO
- 8) Houve realimentação após as avaliações para corrigir erros?
 SIM PARCIALMENTE NÃO
- 9) O material de apoio era de boa qualidade?
 SIM PARCIALMENTE NÃO

10) Observações, críticas, comentários e sugestões.

A-2 ATIVIDADES PARA CASA

ATIVIDADES PARA O PRIMEIRO ENCONTRO

Essa atividade pode ser respondida, acessando o link:

<https://forms.gle/zpQkaPnix7oBFSrq7>

- 1) A lei da gravitação universal afirma que, se dois corpos possuem massa, ambos sofreram uma força de atração mútua. Quanto a essa força, pode-se afirmar que:
 - a) É inversamente proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa.
 - b) É inversamente proporcional às suas massas e diretamente proporcional ao quadrado da distância que separa.
 - c) É diretamente proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa.
 - d) É diretamente proporcional às suas massas e diretamente proporcional ao quadrado da distância que separa.

- 2) Uma das diferenças entre a teoria da relatividade geral e lei da gravitação universal diz respeito às suas condições de validade.
 - a) A que tipo de restrição estava sujeita a lei da gravitação universal de Newton e que desapareceu na teoria da relatividade geral de Einstein?

- b) Qual foi o princípio usado por Einstein na relatividade geral que permitiu a inclusão de referenciais acelerados?

- 3) Julgue as seguintes sentenças abaixo como verdadeira (V) ou falsa (F).
- a) A experiência de um corpo em queda livre num campo gravitacional constante é equivalente à experiência feita por outro observador em um referencial cuja aceleração seja diferente.
 - b) Na visão de Newton do Universo, o espaço é uma “entidade” mutável, com geometria Euclidiana.
 - c) A teoria geral da relatividade tem como ponto de partida o princípio da equivalência, proposto por Einstein em 1911.
 - d) De acordo com Newton, a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço-tempo.
- 4) A gravidade, disse Einstein, realmente movia a matéria ao longo dos caminhos curvos no espaço-tempo — caminhos imprimidos pela massa e pela energia em si. Com base nessa informação, é correto afirmar que para Einstein:
- a) A presença de objetos com massa não altera o espaço-tempo ao redor deles, mas cria uma força atrativa entre eles.
 - b) A geometria do espaço-tempo diz a matéria como se mover, e a matéria reage de volta dizendo ao espaço como se curvar.
 - c) A geometria do espaço tempo não altera o movimento dos corpos.
 - d) A gravidade é força atrativa entre os corpos que deforma o espaço e o tempo permanece absoluto.

ATIVIDADES PARA O SEGUNDO ENCONTRO

Essa atividade pode ser respondida, acessando o link

<https://forms.gle/ZAreGgo2QX9JggLE9>

1) Duas pessoas encontram-se em queda de uma mesma altura, uma com o paraquedas aberto e a outra com ele fechado. Quem chegará primeiro ao solo, se o meio for:

a) o vácuo?

b) o ar?

Justifique:

2) Considere uma estrela em torno da qual gravita um conjunto de planetas. De acordo com a 1ª lei de Kepler:

a) Todos os planetas gravitam em órbitas circulares.

b) Todos os planetas gravitam em órbitas elípticas em cujo centro está a estrela.

c) As órbitas são elípticas, ocupando a estrela um dos focos da elipse; eventualmente, a órbita pode ser circular, ocupando a estrela o centro da circunferência.

d) A órbita dos planetas não pode ser circular.

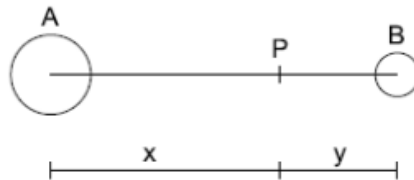
e) A órbita dos planetas pode ter a forma de qualquer curva fechada.

3) Utilizando os simuladores apresentados responda o seguinte questionamento: quando um planeta descreve uma órbita elíptica em torno do Sol. Pode-se dizer que a velocidade de translação desse planeta é:

a) maior quando se encontra mais longe do Sol.

- b) maior quando se encontra mais perto do Sol.
c) menor quando se encontra mais perto do Sol.
d) constante em toda a órbita.
e) As alternativas A e C estão corretas
- 4) A força gravitacional com que a Terra atrai a Lua:
a) é menor do que a força com que a Lua atrai a Terra;
b) é a mesma para todos os planetas;
c) é pouco maior do que a força com que a Lua atrai a Terra;
d) é de mesma natureza da força que faz uma fruta cair de uma árvore;
- 5) Dois corpos A e B, de massa $16M$ e M , respectivamente, encontram-se no vácuo e estão separados por uma certa distância. Observa-se que um outro corpo, de massa M , fica em repouso quando colocado no ponto P, conforme a figura. A razão x/y entre as distâncias indicadas é igual a:

- a) 2
b) 4
c) 6
d) 8
e) 16



ATIVIDADES PARA O TERCEIRO ENCONTRO

Essa atividade pode ser respondida, acessando o link:

<https://forms.gle/fXpVbP4W93bUPTAJ7>

- 1) Quando fazem manobras muito bruscas, os pilotos de caça usam uma vestimenta especial que comprime suas pernas, impedindo que o sangue flua para elas e provoque desmaios. Com essas vestimentas eles conseguem suportar acelerações da ordem de 9g. Comente o significado da última frase, sob o ponto de vista do princípio da equivalência.

- 2) A gravidade, disse Einstein, realmente movia a matéria ao longo dos caminhos curvos no espaço-tempo – caminhos imprimidos pela massa e pela energia em si.

Com base nessa informação, é correto afirmar que para Einstein:


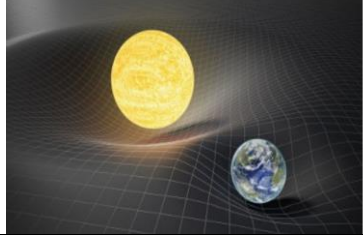
- e) A presença de objetos com massa não altera o espaço-tempo ao redor deles, mas cria uma força atrativa entre eles.
 - f) A geometria do espaço-tempo diz a matéria como se mover, e a matéria reage de volta dizendo ao espaço como se curvar.
 - g) A geometria do espaço tempo não altera o movimento dos corpos.
 - h) A gravidade é força atrativa entre os corpos que deforma o espaço e o tempo permanece absoluto.
- 3) A teoria de Einstein foi comprovada a partir da explicação satisfatória dois fenômenos que a gravidade newtoniana não conseguia explicar. Nestas condições indique, entre as seguintes alternativas, aquela que possui os dois fenômenos corretamente:

- a) O desvio na órbita do planeta Mercúrio e o efeito foto elétrico.
 - b) O desvio na órbita do planeta Mercúrio e a radiação do corpo negro.
 - c) O desvio na órbita do planeta Mercúrio e a curvatura da luz próxima copos surpresados.
 - d) A curvatura da luz próxima copos surpresados e o efeito foto elétrico.
- 4) Critique a seguinte afirmação: “A teoria da relatividade geral só se aplica a objetos extremamente densos, como estrelas de neutros ou buracos negros, não valendo para massas como a da Terra, que obedece à teoria da gravitação universal de Newton”.

A-3 SEQUÊNCIAS DE ENSINO

Disponível: https://drive.google.com/drive/u/2/folders/10pk-f73zhI2IV_Ufm7VFvplf7kJphTW

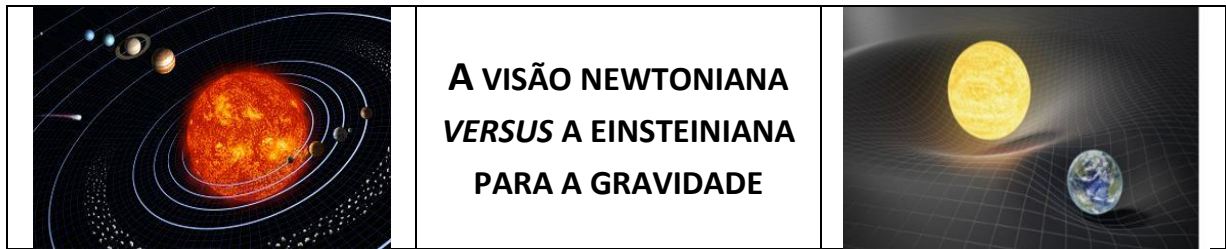
SEQUÊNCIA DE ENSINO - PRIMEIRO ENCONTRO

	A VISÃO NEWTONIANA VERSUS A EINSTEINIANA PARA A GRAVIDADE	
DISCIPLINA: Física		
TEMA DA AULA: A gravidade		PRIMEIRO ENCONTRO
TÍTULO: O que é gravidade? O que é espaço? O que é tempo? O que é espaço-tempo?		
ESCOLA:		
PROFESSOR: Maria Adna		
PÚBLICO ALVO: Alunos do 3º ano do Ensino Médio		
DURAÇÃO DE CADA ENCONTRO: 1h:30min (duas aulas, cada uma com 45 minutos)		
CONHECIMENTO PRÉVIO (SUBSUNÇORES): Conceito intuitivo de movimento, gravidade, atração entre corpos.		
O QUE OS ESTUDANTES DEVEM APRENDER: A diferença entre a visão clássica e relativística para o conceito de gravidade.		
AO FIM DAS AULAS, OS ALUNOS DEVEM SER CAPAZES DE: Entender que a gravidade é um conceito usado de certa forma pra explicar a tração entre corpos.		
OBJETIVOS:	Discutir o conceito de gravidade e analisar as diferenças entre a Teoria da gravidade de Newton e de Einstein.	
CONTEÚDOS PROGRAMÁTICOS:	Teoria da Gravitação Universal; Teoria da Relatividade Geral.	
DISCIPLINAS CONTEMPLADAS:	Física; História da Ciência.	
METODOLOGIA:	<p>1º momento – Resgatando os conhecimentos prévios</p> <p>Para dar início à sequência didática, o professor pode entregar, aos alunos, o material de apoio, desenvolvido nesta monografia para que eles possam acompanhar o conteúdo e tomarem conhecimento do tema das próximas aulas. Antes de dar início à introdução dos conceitos científicos, os discentes devem ser indagados sobre qual seria o conceito de gravidade para os mesmos e como seria possível “visualizar” a gravidade no cotidiano? Este momento, de discussão direta entre estudantes e professor se faz necessário para conceber os conhecimentos</p>	

	<p>prévios/espontâneo dos alunos, bem como diagnosticar o grau de maturação da turma.</p> <p>2º momento – Exposição de vídeo</p> <p>Em seguida será exibido o vídeo “Além do Cosmos: O Espaço” para contextualizar e possibilitar uma visão geral sobre o conceito da gravidade, tanto na física clássica, proposta por Isaac Newton, em que a gravidade é uma força atrativa entre corpos, quanto na física moderna, apresentada por Albert Einstein, na qual a gravidade deixa de ser vista, meramente, como uma força como sugerida por Newton e passa ser resultante da deformação do espaço-tempo. A exibição do vídeo tem o intuito “fascinar” os alunos para o estudo que se iniciará.</p> <p>3º momento</p> <p>Após os alunos assistirem o vídeo motive então uma troca de ideias a respeito das teorias apresentadas dando aos estudantes a oportunidade de intervenção e colaboração. Desta forma, o professor compreenderá as dúvidas dos discentes em “tempo real” e poderá agir de tal forma para contribuir para o avanço da aprendizagem por um processo metodológico dialogado. Sugere-se enfatizar aqui os aspectos qualitativos e conceituais da gravidade para que os estudantes possam ancorar seus conhecimentos anteriores aos novos conhecimentos apresentados.</p> <p>4º momento – Atividade virtual no <i>google forms</i>.</p> <p>Após essa breve discussão aproveite que os estudantes estão envolvidos e proponha uma atividade de fixação que servirá de contraponto para a próxima aula. A atividade virtual disponibilizada pelo professor, no <i>google forms</i>, objetiva que o discente responda as questões de múltipla escolha para que compreenda e exercite os novos conhecimentos adquiridos. Caso não haja a possibilidade de realizar atividade virtualmente, a mesma também pode ser impressa. Nesta aula, os alunos devem ter uma visão geral sobre as duas teorias da gravidade, estando preparados para as aplicações dos conceitos das aulas seguintes.</p>
<p>RECURSOS DIDÁTICOS:</p>	<p>Projektor multimídia; Lousa; Marcador para quadro branco; Exercícios virtuais ou impressos.</p>

AVALIAÇÃO:	A avaliação para esta aula será dada de forma diagnóstica e contínua. Levará em consideração a participação dos alunos ao decorrer da aula, seja ela através de indagações, pontos de vistas, ideias contrárias, etc. Ao término da aula será apresentada uma sequência de exercício os quais os discentes deverão responder em casa. Na próxima aula, os discentes deverão apresentar suas respostas explicando os métodos utilizados para solucionar os problemas.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	PIETROCOLA, Maurício... [et. al]. Física em contextos: Ensino Médio. Vol. 1 e 3, 1. Ed. – São Paulo: Editora do Brasil, 2016. GASPAR, ALBERTO, G. Compreendendo a Física: ondas, óptica e termodinâmica. Vol 1 e 3, 2 Ed. – São Paulo: Editora Ática, 2013. GUALTER, J. B.; NEWTON, V. B.; HELOU, R. D. Física 3 . 2. ed. São Paulo: Editora Saraiva, v. 1 e 3, 2013.
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES:	HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. vol. 1 e 4. 8. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009. Vídeo: “ Além do Cosmos: O Espaço ”. Disponível em: https://drive.google.com/drive/u/4/my-drive .

SEQUÊNCIA DE ENSINO - SEGUNDO ENCONTRO



DISCIPLINA: Física

TEMA DA AULA: A gravidade aos olhos de Newton

SEGUNDO ENCONTRO

TÍTULO: Por que tudo que sobe desce? E por que a Terra não cai em cima do Sol?

ESCOLA:

PROFESSOR: Maria Adna

PÚBLICO ALVO: Alunos do 3º ano do Ensino Médio

DURAÇÃO DE CADA ENCONTRO: 1h:30min (duas aulas, cada uma com 45 minutos)

CONHECIMENTO PRÉVIO (SUBSUNÇORES): Conceito intuitivo de movimento, gravidade, atração entre corpos.

O QUE OS ESTUDANTES DEVEM APRENDER: O conceito clássico para a gravidade, as leis de Kepler e a lei da Gravitação Universal de Newton.

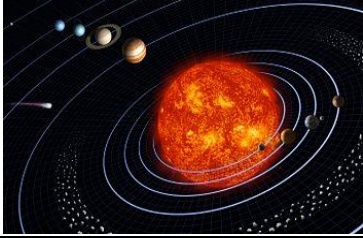
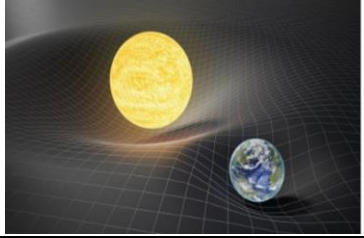
AO FIM DAS AULAS, OS ALUNOS DEVEM SER CAPAZES DE: Entender como se dá a tração entre corpos, compreender como é a geometria das órbitas planetárias em torno do Sol.

OBJETIVOS:	Entender os conceitos, leis e formulações matemáticas relativas à Teoria da Gravitação Universal bem como interligá-las com os históricos.
CONTEÚDOS PROGRAMÁTICOS:	Queda livre. Leis de Kepler: Teoria da Gravitação Universal;
DISCIPLINAS CONTEMPLADAS:	Física; História da Ciência.
METODOLOGIA:	<p>1º momento – Resgatando os conhecimentos prévios</p> <p>Retomando a comparação realizada de forma generalizada na aula anterior, entre a visão da gravidade newtoniana e einsteiniana, será apresentada de forma expositiva e dialogada mais detalhadamente a Teoria da Gravitação Universal. Para começar essa aula, sugere-se que o vídeo “Campo Gravitacional” seja exibido para fazer uma breve contextualização histórica da Teoria da gravidade de Newton como uma estratégia que permite favorecer uma melhor compreensão do conteúdo. Tendo em vista que, muitas foram às contribuições dos vários físicos antecessores a Newton. Para tanto, é interessante fazer uma digressão sobre movimentos dos corpos que é normalmente estudado</p>

	<p>no 1º ano do ensino Médio, sempre fazendo com que os alunos interajam e apresente seus conhecimentos prévios.</p> <p>2º momento – Exposição de simuladores</p> <p>Na sequência deve ser feita uma breve explicação das três Leis de Kepler, considerando-se que, serviam como base para a formulação da Teoria da gravidade de Newton. Para melhor compreensão do conteúdo, propõe-se a apresentação de simuladores (que poderão ser acessados a partir do link disponibilizados nas referencias) para ilustrar a primeira, segunda e terceira Lei de Kepler. Os alunos deverão manusear os simuladores e fazer anotações responder alguns questionamentos proposto pelo professor.</p> <p>3º momento – Exposição de vídeos</p> <p>No terceiro momento, será apresentado o vídeo “Gravidade e Órbitas” que explica a noção intuitiva de Newton para a gravidade: uma força atrativa que age entre os corpos e, que é diretamente proporcional ao produto das massas inversamente proporcional ao quadrado da distancia entre elas. Explícite que, do ponto de vista atual, a ideia da gravidade como sendo meramente uma força não constitui uma explicação satisfatória para a explicação de alguns fenômenos, como por exemplo: o desvio da órbita de Mercúrio e a curvatura da luz quando passa próxima ao Sol. Ressalte também que por está razão foi necessária a criação de uma nova teoria a ‘Teoria da Relatividade Geral’ que será apresentada na próxima aula.</p> <p>4º momento – Atividade virtual no <i>google forms</i>.</p> <p>Feita abordagem do conteúdo deve ser realizado, com o auxílio do <i>google forms</i>, a atividade proposta no Apêndice A, com o intuito de obter um <i>feedback</i> dos alunos, em relação aos conceitos até então apresentados.</p>
<p>AVALIAÇÃO:</p>	<p>A avaliação para esta aula será dada de forma diagnostica e continua. Levará em consideração a participação dos alunos ao decorrer da aula, seja ela através de indagações, pontos de vistas, ideias contrárias, etc. Ao término da aula será apresentada uma sequência de exercício os quais os discentes deverão responder em casa. Na próxima aula, os discentes deverão apresentar suas respostas explicando os métodos utilizados para solucionar os problemas.</p>
<p>RECURSOS DIDÁTICOS:</p>	<p>Projeter multimídia; Quadro branco; Marcador para quadro branco;</p>

	Exercícios virtuais ou impressos.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	PIETROCOLA, Maurício... [et. al]. Física em contextos: Ensino Médio. Vol. 1 e 3, 1. Ed. – São Paulo: Editora do Brasil, 2016. GASPAR, ALBERTO, G. Compreendendo a Física: ondas, óptica e termodinâmica. Vol 1 e 3, 2 Ed. – São Paulo: Editora Ática, 2013. GUALTER, J. B.; NEWTON, V. B.; HELOU, R. D. Física 3. 2. ed. São Paulo: Editora Saraiva, v. 1 e 3, 2013.
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES:	HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. vol. 1 e 4. 8. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009.


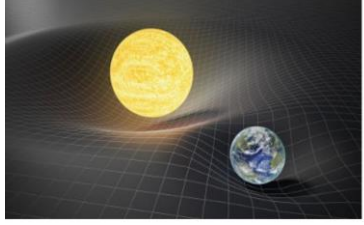
SEQUÊNCIA DE ENSINO - TERCEIRO ENCONTRO

	<p>A VISÃO NEWTONIANA VERSUS A EINSTEINIANA PARA A GRAVIDADE</p>	
DISCIPLINA: Física		
TEMA DA AULA: A gravidade aos olhos de Einstein.		TERCEIRO ENCONTRO
TÍTULO: Por que o espaço é curvo?		
ESCOLA:		
PROFESSOR: Maria Adna		
PÚBLICO ALVO: Alunos do 3º ano do Ensino Médio		
DURAÇÃO DE CADA ENCONTRO: 1h:30min (duas aulas, cada uma com 45 minutos)		
CONHECIMENTO PRÉVIO (SUBSUNÇORES): Conceito formal da gravidade newtoniana.		
O QUE OS ESTUDANTES DEVEM APRENDER: O conceito moderno da gravidade como sendo decorrente da curvatura do espaço.		
AO FIM DAS AULAS, OS ALUNOS DEVEM SER CAPAZES DE: Diferenciar o conceito clássico do moderno para a gravidade, e compreender os agentes causadores da força gravitacional para as duas visões.		
OBJETIVOS:	Entender os conceitos, leis relativas à Teoria da Relatividade geral assim como interligá-las com os conhecimentos cotidianos dos estudantes.	
CONTEÚDOS PROGRAMÁTICOS:	Teoria da Gravitação Universal; Teoria da Relatividade Geral.	
DISCIPLINAS CONTEMPLADAS:	Física; História da Ciência.	
METODOLOGIA:	<p>1º momento – Resgatando os conhecimentos prévios</p> <p>Nessa aula, trataremos conceito de gravidade, mesmo que de maneira sutil, de acordo com ideia da Relatividade Geral de Einstein. Para isso, uma situação problema deve ser lançada, logo no início: O espaço e o tempo são absolutos? Como acontece a curvatura do espaço? A gravidade é realmente uma força? A da luz é afetada pela deformação do espaço tempo? Essas questões poderão ser respondidas ao longo da aula conforme os discentes vão assimilando os conceitos abordados nos vídeos e as explicações do professor.</p> <p>2º momento – Exposição de vídeo</p> <p>Logo em seguida, se dará a ministração da aula por uma intersecção de quatro pequenos vídeos seguindo o</p>	

	<p>conteúdo de forma pragmática. Após a discussão inicial, apresente o primeiro vídeo sobre o “Teria da gravidade segundo Albert Einstein”. Esse vídeo é bem ilustrado e explicativo e ajudará os alunos a entenderem de que forma a matéria deforma o espaço-tempo. Peça para os estudantes façam comentários sobre o vídeo, relatando se é possível percebermos a curvatura do espaço-tempo em nosso dia a dia.</p> <p>O segundo vídeo “Relatividade de Einstein: se o Sol desaparecesse?” de aproximadamente 12 minutos que ilustra exatamente como veríamos a trajetória da luz de uma estrela de o espaço-tempo fosse plano.</p> <p>No terceiro vídeo “Simulador do efeito gravitacional da contração do espaço” a ideia de curvatura do espaço-tempo é apresentada de forma simples e lúdica, por intermédio de um experimento. Com o intuito de fazer com que os discentes percebam que a gravidade trata-se de uma deformação do espaço-tempo e, não de uma força.</p> <p>Para encerrar a aula, sugere-se que o professor apresente aos alunos mais um vídeo de aproximadamente 16 minutos: “100 anos do eclipse em Sobral. Teoria da Relatividade Geral”. Esse vídeo apresenta de forma explícita e interativa como foi confirmada a Relatividade de Einstein por meio das observações do eclipse solar total, do dia 29 de maio de 1929, realizado na cidade de Sobral, aqui no Brasil.</p> <p>Após a exibição de cada vídeo, abra uma discussão frente à aos conceitos apresentados.</p> <p>3º momento – Atividade virtual no <i>google forms</i>.</p> <p>Com um teste rápido, disponibilizado pelo professor pelo <i>google forms</i>, estimule os estudantes a compreenderem a essência da Relatividade de Einstein tendo o espaço e tempo como relativos. Para concluir a aula peça que os alunos leiam em casa o texto de apoio, entregue no primeiro momento, grifando e refletindo sobre os principais pontos do texto, isso servirá como preparação para a atividade que será aplicada na próxima aula.</p>
<p>AVALIAÇÃO:</p>	<p>A avaliação para esta aula será dada de forma diagnóstica e contínua. Levará em consideração a participação dos alunos ao decorrer da aula, seja ela através de indagações, pontos de vistas, ideias contrárias, etc. Ao término da aula será apresentada uma sequência de exercício os quais os discentes deverão responder em casa. Na próxima aula, os discentes deverão apresentar suas respostas explicando os métodos utilizados para solucionar os problemas.</p>

RECURSOS DIDÁTICOS:	<p>Projetor de vídeo; Quadro branco; Marcador para quadro branco; Exercícios virtuais ou impressos.</p>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	<p>PIETROCOLA, Maurício... [et. al]. Física em contextos: Ensino Médio. Vol. 1 e 3, 1. Ed. – São Paulo: Editora do Brasil, 2016. GASPAR, ALBERTO, G. Compreendendo a Física: ondas, óptica e termodinâmica. Vol 1 e 3, 2 Ed. – São Paulo: Editora Ática, 2013. GUALTER, J. B.; NEWTON, V. B.; HELOU, R. D. Física 3. 2. ed. São Paulo: Editora Saraiva, v. 1 e 3, 2013.</p>
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES:	<p>HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. vol. 1 e 4. 8. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009. Vídeos: “Teria da gravidade segundo Albert Einstein”; “Relatividade de Einstein: se o Sol desaparecesse?”; “Simulador do efeito gravitacional da contração do espaço”; “100 anos do eclipse em Sobral. Teoria da Relatividade Geral”. Disponível em: https://drive.google.com/drive/u/4/my-drive</p>

SEQUÊNCIA DE ENSINO - QUARTO ENCONTRO

	<p>A VISÃO NEWTONIANA VERSUS A EINSTEINIANA PARA A GRAVIDADE</p>	
DISCIPLINA: Física		
TEMA DA AULA: Uma apreciação do curso		QUARTO ENCONTRO
TÍTULO: A UEPS funcionou? Sim ou não?		
ESCOLA:		
PROFESSOR: Maria Adna		
PÚBLICO ALVO: Alunos do 3º ano do Ensino Médio		
DURAÇÃO DE CADA ENCONTRO: 1h:30min (duas aula, cada uma com 45 minutos)		

OBJETIVOS:	Avaliar o desenvolvimento e nível de aquisição dos conteúdos por parte dos alunos, bem como avaliar a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS).
CONTEÚDOS PROGRAMÁTICOS:	Teoria da Gravitação Universal; Teoria da Relatividade Geral.
DISCIPLINAS CONTEMPLADAS:	Física; História da Ciência.
METODOLOGIA:	<p>Nesta etapa, faremos dois tipos de avaliação:</p> <p>1) avaliação diagnóstica; onde poderemos identificar os subsídios para alisar o grau de aprendizagem, bem como o entendimento final dos discentes frente aos conteúdos abordados na UEPS. Para tanto, deverá ser disponibilizado aos alunos folhas de papel A4 para que os mesmos possam construir um mapa conceitual a partir da leitura e anotações feitas em casa do texto de apoio, entregue na primeira aula. A construção do mapa conceitual tem como objetivo fazer com que os alunos sintetizem e estabeleçam relações entre os novos conceitos, além de verificar se houve uma parcial, total ou nenhuma assimilação frente aos conteúdos abordados.</p> <p>2) Questionário no google forms; no qual pretende-se avaliar o quanto o uso de vídeos e simuladores contribui para o ensino-aprendizagem. Assim como, verificar os objetivos alcançados e àqueles em que precisa-se melhorar, de modo que seja possível o encaminhamento de soluções para a melhoria dessa UEPS. Para isso solicite a todos os alunos que respondam o questionário (Apêndice A) Para realizar um diagnóstico dos nossos encontros e dos resultados obtidos na UEPS, solicite a todos os alunos que respondam este questionário, com total liberdade para colocar sua visão,</p>

	suas críticas e sugestões., com total liberdade para colocar sua visão, suas críticas e sugestões.
RECURSOS DIDÁTICOS:	Projeto de vídeo; Quadro branco; Marcador para quadro branco; Questionário; Cartolinas.
AVALIAÇÃO:	A avaliação para esta aula será dada de forma diagnóstica e contínua. Levará em consideração a participação dos alunos ao decorrer da aula, e o desenvolvimento do mapa conceitual.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	PIETROCOLA, Maurício... [et. al]. Física em contextos: Ensino Médio. Vol. 1 e 3, 1. Ed. – São Paulo: Editora do Brasil, 2016. GASPAR, ALBERTO, G. Compreendendo a Física: ondas, óptica e termodinâmica. Vol 1 e 3, 2 Ed. – São Paulo: Editora Ática, 2013. GUALTER, J. B.; NEWTON, V. B.; HELOU, R. D. Física 3. 2. ed. São Paulo: Editora Saraiva, v. 1 e 3, 2013.
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES:	HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. vol. 1 e 4. 8. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009. Moreira, M.A. e Buchweitz, B. (1993). Novas estratégias de ensino e aprendizagem: os mapas conceituais e o Vê epistemológico. Lisboa: Plátano Edições Técnicas.