

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO



INSTITUTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA

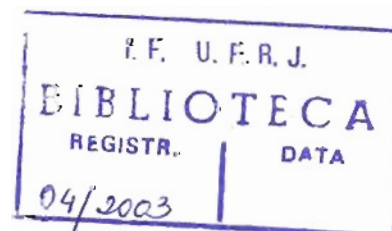
AS LEIS DE KEPLER E A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL NO ENSINO MÉDIO

Aluno: **Luis Alfredo Julius Wurts**

Orientador: Prof. Adir Moysés Luiz

04/2003

2003



Agradecimentos

Professor Adir M. Luiz,

Obrigado pela paciência que teve em ser meu orientador. A sua eficiência, dedicação e capacidade foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Professor Ney Vugman,

Este é um agradecimento especial para o professor que acreditou em mim no momento mais difícil da minha vida acadêmica, foi um grande orgulho em tê-lo como professor em duas oportunidades e constatar não só de mim como de outros alunos como sendo um professor didaticamente perfeito, pelas explicações, pela conduta e pelos vários métodos e conselhos no ensino não só da física, mas como profissionais e pessoas dignas dessa grande responsabilidade. Pela minha admiração, muito obrigado.

Ao Professor Arthur Chaves

Agradecimento especial por todos os favores, conversas e conselhos que recebi nesses cinco anos. Sem essa ajuda o curso se tornaria bem mais difícil. Sei que nunca agradecerei o suficiente, mas vou tentar desempenhar a minha profissão com o mesmo entusiasmo e perseverança que o senhor sempre tentou ensinar-nos. Muito obrigado.

Meus pais,

Agradeço pela oportunidade de vida que me deram, principalmente a minha mãe Alba que esteve do meu lado em todos os momentos e mesmo não concordando com algumas escolhas, esteve sempre ajudando e nunca se negou a isso, pela paciência que teve pela falta de horário e muita das vezes falta de carinho devido essa estrada difícil que percorri. Seria muita pretensão agradecer todo esse esforço e fazer uma homenagem, não conseguiria fazer isso jamais. O melhor agradecimento deve ser feito pela conduta, ética e solidariedade que conduzirei pelo resto da minha vida.

Claudia,

Apesar de algumas vezes ter sido muito rígida na sua vontade de ajudar, é outra pessoa em que não conseguiria mensurar meus agradecimentos, o meu amor por você é tão grande que as nossas atitudes viraram obrigações talvez por isso as pequenas brigas que logo se resolvem, quero dizer que é tão importante que quando me refiro a você, chamo de madrinha e logo depois destaco que também é minha irmã. Desde de criança a minha afinidade por você é vidente e nada melhor que nos dois para sabermos disso.

Familiares,

Não vou citar todos os nomes, mas agradeço a Elke que fez uma grande publicidade em torno das minhas aulas, acreditando na minha capacidade. Ao meu grande irmão Eric pela empolgação que manifesta quando faço pequenas conquistas e por estar sempre disposto a ajudar e assumir responsabilidades. Por todos os meus cunhados, e sobrinhos que fizeram e fazem a minha felicidade no dia-a-dia, em especial pelo grande amigo que se tornou o meu sobrinho Diego.

Alexandre Magno

Ao meu novo e grande amigo que juntos conseguimos conquistar parte de nossos objetivos, muito obrigado pela sua amizade e grande força que me concedeu, nunca esquecerei que o meu início em sala de aula foi graças a sua confiança e incentivo, mas as nossas conquistas só estarão completas quando você se formar, aí comemoraremos juntos e farei questão de colocar o "canudo na sua mão", tenho certeza que em breve faremos a nossa comemoração.

Rivaldo Jr,

Quero aproveitar esse espaço para falar desta pessoa magnífica. Quando terminei a 7º serie em um supletivo em que estava desacreditado por todos, foi à única pessoa que me incentivou a continuar os estudos, assumindo responsabilidades que não tinha obrigação até os dias de hoje, não pela ajudas financeiras, mas pelas varias horas que se dedicou para ajudar a recuperar o meu tempo perdido principalmente na matemática, o sacrifício das varias noites e até as madrugadas em que estudamos juntos. Tenho certeza que a minha afinidade em educar outras pessoas veio de você. A visão que tinha das matérias exatas e

a dificuldade se acabaram com a maneira detalhista em que explicava, a minha admiração foi tão grande que acabei me tornando professor. Lembro-me da primeira aula particular que dei, na véspera fui na sua casa pedir explicação, não pelo conteúdo, mas para saber explicar tão bem. Ficaria escrevendo toda a minha admiração por esta pessoa como homem, pai, irmão e amigo. Só não dedicarei essa vitória a você meu irmão, pois a meu agradecimento seria muito pouco, nunca conseguirei agradecer por todas as horas, até nos momentos em que não acreditou em mim, e mesmo assim nunca se pronunciou em críticas ou desânimos, mas sim pela vontade de tentar, saudações tricolores.

Frases

Um tempo em que aprendi a entender as coisas de mar, a conversar com as grandes ondas e não discutir com o mau tempo. A transformar o medo em respeito, o respeito em confiança.

Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E para se chegar onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso antes de mais nada querer.

Amyr Klink

O merecimento maior é do homem que se encontra na arena com o rosto coberto de suor e sangue, que conhece as grandes devastações e os grandes entusiasmos, pois mesmo tendo fracassado jamais poderão ser substituídos por essas almas tímidas e frias, que não conhecem vitórias nem derrotas.

Martin L. King

... Mesmos com tantos motivos
Pra deixar tudo como está
Nem desistir, nem tentar
Agora, tanto faz
Estamos indo de volta pra casa.

Renato Russo

RESUMO

Este trabalho apresenta propostas de aulas que tratam das leis de Kepler e Gravitação universal com a intenção de levar o aluno a compreender com mais clareza o que acontece em nosso sistema solar.

A primeira parte deste trabalho tem como ponto de partida um questionário com perguntas básicas dos assuntos relacionados e a análise das respostas nos permitem fazer um trabalho, baseado em conhecimentos adquiridos anteriormente. Este trabalho procura não só apresentar as teorias ^{depois} como algumas noções de tamanho e distância do sistema solar, com experiências práticas e fáceis de fazer, sem esquecer de abordar noções de física moderna que geralmente são omitidas nos livros de segundo grau, como a teoria da relatividade de Einstein.

} de onde tiro

A segunda parte deste trabalho dedica-se a definições de alguns conceitos básicos relacionados com as Leis de Kepler e a Gravitação.

A terceira parte do trabalho se refere ao estudo da física moderna; nesta seção vamos descrever diversos conceitos de relatividade geral, bem como algumas das suas aplicações.

Finalmente apresentamos as conclusões deste trabalho, fazendo uma discussão dos temas abordados de uma forma incentivadora e informativa não só para a vida escolar do aluno e sim para o seu dia-a-dia.

ÍNDICE

1	Introdução	1
2	Leis de Kepler	4
2.1	Evolução Histórica	4
2.2	Principais astrônomos da Grécia antiga	5
2.3	Astronomia Medieval	7
2.4	Principais astrônomos da idade média	8
2.5	As leis de Kepler	16
3	Gravitação Universal	18
3.1	Evolução Histórica	18
3.2	Força Gravitacional	22
3.3	Energia Potencial Gravitacional	23
3.4	Aceleração da Gravidade	24
3.5	A teoria moderna da gravitação universal	26
3.6	Relatividade Geral	29
4	Experiências	36
4.1	Primeira Experiência	36
4.2	Segunda Experiência	39
4.3	Terceira Experiência	41
5	Conclusão	42
	Referências	43

1 INTRODUÇÃO

A gravitação universal e as leis de Kepler ^{quando apresentadas na escola.} despertam pouco interesse nos alunos. Realizando uma pesquisa nos livros da 6ª série [1], na qual o aluno tem o primeiro contato com o sistema solar, verifica-se a dificuldade de apresentar uma noção exata dos tamanhos e distâncias dos astros. Na Tabela 1 mostramos os dados dos planetas e do sistema solar. Na Figura 1 mostramos a representação do sistema solar que é mostrada nos livros. A segunda pesquisa foi realizada em três livros de física do segundo grau: *Os Fundamentos da Física* [2], *Física Clássica* [3] e *Temas de Física* [4]. Os livros não apresentam temas para uma discussão mais ampla sobre o assunto e aplicações para que possamos desenvolver o senso crítico do aluno.

O trabalho foi feito em três etapas: a primeira envolve a aplicação de questionário para fazermos um levantamento do conhecimento dos alunos sobre o tema abordado; a segunda etapa tem como objetivo a parte histórica que começa na Grécia antiga, passa pelas teorias que foram desenvolvidas e se encerra na explicação das teorias modernas, como a relatividade de Einstein; a terceira parte do trabalho fornece experiências para serem feitas em sala de aula para buscarmos motivação entre os alunos.

INTRODUÇÃO

	Distância (10 ⁶ km)	Distância (UA)	Raio (Terra)	Massa (Terra)	N ^o Luas	Volume (Terra)	Gravidade (Terra)	Densidade (g/cm ³)
Sol	0	0	109	332.900	9	1.300.000	27,9	1,410
Mercúrio	57,9	0,39	0,38	0,05	0	0,056	0,38	5,42
Vênus	108,2	0,72	0,95	0,81	0	0,86	0,89	5,25
Terra	149,6	1,0	1,00	1,00	1	1	1,00	5,52
Marte	227,9	1,5	0,53	0,11	2	0,15	0,38	3,94
Júpiter	778,3	5,2	11,2	318	16	1 323	2,54	1,33
Saturno	1.429,4	9,5	9,4	95	18	744	1,07	0,69
Urano	2.870,9	19,2	4	14	15	64	0,80	1,27
Netuno	4.504,3	30,1	3,9	17	8	59	1,14	1,71
Plutão	5.913,0	39,5	0,18	0,002	1	0,006	0,07	2,05

Tabela 1 Dados Astronômicos do sistema solar [5].

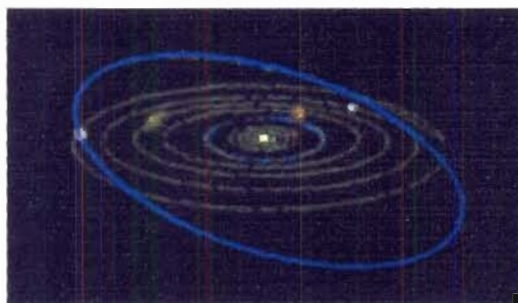


Figura 1 Representação do Sistema Solar em livros da 6ª série do ensino fundamental [1].

Para obtermos informações sobre alguns assuntos que serão abordados nesta monografia, foram aplicados 120 questionários entre alunos das escolas de 2ª e 3ª série do segundo grau: Sistema MV1 unidade Méier, Colégio Ícaro e Colégio Palas. Mostramos a seguir as perguntas do questionário e na Tabela 2 os resultados.

INSTRUMENTO
PARA
DIAGNÓSTICO

- 1) A massa de uma pessoa na Terra possui o mesmo valor da massa na Lua?
- 2) O peso desta pessoa na Terra possui o mesmo valor na Lua?
- 3) Considere uma nave em órbita em torno da Terra. Você sabe explicar por que os astronautas dentro da nave flutuam?
- 4) Qual é a trajetória dos planetas em torno do Sol?
- 5) Por que a Lua permanece em movimento de rotação na órbita da Terra?
- 6) É certo afirmar que dois corpos sofrem ^{(re) atração} atração devido a suas massas?
- 7) A força com a qual a Terra atrai a Lua, possui a mesma natureza da força com a qual a Terra atrai uma maçã? Justifique.
- 8) Por que os corpos são atraídos para a Terra?

Pergunta	Sim	Não	Não sabe	Falta de gravidade	Falta de ar	Queda livre	Força gravitacional	Circular	Elipse	Devido à massa
1	57%	43%	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2	27%	73%	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3	-----	-----	4%	83%	4%	9%	-----	-----	-----	-----
4	-----	-----	26%	-----	-----	-----	-----	69%	5%	-----
5	-----	-----	64%	-----	-----	-----	29%	-----	-----	-----
6	45%	47%	8%	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7.1	30%	47%	23%	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7.2	-----	-----	23%	-----	-----	-----	51%	-----	-----	26%
8	-----	-----	36%	-----	-----	-----	64%	-----	-----	-----

Tabela 2 Resultados do levantamento

Na apresentação desta monografia, depois desta introdução, seguimos o seguinte roteiro. No capítulo 2 discutimos as leis de Kepler, no capítulo 3 fazemos uma discussão sobre a gravitação universal, incluindo também conceitos modernos sobre este tema, no capítulo 4 discutimos algumas experiências e no capítulo 5 apresentamos as conclusões do nosso trabalho.

2 LEIS DE KEPLER

Neste capítulo veremos a história da astronomia, que tem início na Grécia antiga, período no qual houve um grande avanço nos estudos desta matéria. Em contrapartida, o período medieval representou um grande atraso para a ciência, devido às imposições da Igreja Católica. Chegamos em seguida até o século XVI, quando a Igreja Católica perde o seu poder e os estudos sobre astronomia são desenvolvidos com maior liberdade. No final, as leis de Kepler são apresentadas com as suas aplicações mais importantes. Usamos como fonte de pesquisa os livros: *A Dança do Universo* [6], *Seis Caminhos a Partir de Newton* [7] e *O Universo numa Casca de Noz* [8].

(7, 10, 16, 24, 32, 40)

2.1 Evolução Histórica

As especulações sobre a natureza do Universo vêm dos tempos pré-históricos, por isso a astronomia é freqüentemente considerada a mais antiga das ciências. Desde a antiguidade, o céu vem sendo usado como mapa, calendário e relógio. Os registros astronômicos mais antigos datam de aproximadamente 3000 a.C. e se devem aos chineses, babilônios, assírios e egípcios. Naquela época, os astros eram estudados com objetivos práticos, como medir a passagem do tempo (fazer calendários) para prever a melhor época para o plantio e a colheita, ou com objetivos mais relacionados à astrologia, como fazer previsões do futuro, já que acreditavam que os deuses do céu tinham o poder da colheita, da chuva e mesmo da vida.

O ápice da ciência antiga se deu na Grécia, de 600 a.C. a 400 d.C., a níveis só ultrapassados no século XVI. Do esforço dos gregos em conhecer a natureza do universo, e com o conhecimento herdado dos povos mais antigos, surgiram os primeiros conceitos de Esfera Celeste, uma esfera de material cristalino, incrustada de estrelas, tendo a Terra no centro. Desconhecedores da rotação da Terra, os gregos imaginaram que a esfera celeste girava em torno de um eixo passando pela Terra. Observaram que todas as estrelas giram em torno de um ponto fixo no céu e consideraram esse ponto como uma das extremidades do eixo de rotação da esfera celeste.

Há milhares de anos, os astrônomos sabem que o Sol muda sua posição no céu ao longo do ano, se movendo um grau para leste por dia. O tempo para o Sol completar uma volta na esfera celeste define um ano. O caminho

aparente do Sol no céu durante o ano define a eclíptica.

As constelações são grupos aparentes de estrelas. Os antigos gregos, e os chineses e egípcios antes deles, já tinham dividido o céu em constelações.

2.2 Principais astrônomos da Grécia antiga

Tales de Mileto (~624 - 546 a.C.) Era considerado um dos sete homens mais sábios da Grécia. Tales tinha um grande conhecimento de astronomia e metrologia e conseguiu prever um eclipse solar. Foi ele que introduziu na Grécia os fundamentos da geometria e da astronomia, trazidos do Egito. Pensava que a Terra era um disco plano com uma vasta extensão de água. Ele dizia que se nós dependemos de água então o universo também dependeria da mesma.

Anaximandro de Mileto Era aproximadamente 14 anos mais novo que Tales. Ele modernizou as teorias de Tales dizendo que o universo era eterno e infinito em extensão e a terra ocuparia o centro desse universo, na qual era de forma cilíndrica e a razão entre o seu diâmetro e seu raio era de um terço. Anaximandro dizia que o nosso planeta era envolto de uma grande roda cósmica cheia de fogo, onde o Sol era apenas um furo que deixava esse fogo sair e esse furo acompanhava a rotação da roda cósmica explicando assim o movimento do Sol. A Lua tinha o mesmo mecanismo, mas em outra roda cósmica, assim explicando as fases da Lua, e as estrelas eram pequenos furos que curiosamente eram mais próximos do que a Lua, e o Sol numa terceira roda cósmica.

Pitagóricos: O Sol e os planetas devem satisfazer às mesmas leis harmônicas. Eles acreditavam que as distâncias entre os planetas devem obedecer às mesmas razões entre números inteiros satisfeitas pela nota musical. Eles diziam que a Terra se move, e que não era o centro do universo. Achavam que os planetas, o Sol, e a Lua eram transportados por esferas separadas da que carregava as estrelas. Foram os primeiros a chamar o céu de cosmos. Filolau que era integrante da seita dos Pitagóricos e imaginava que a Terra girava em torno de um fogo central que ele chamava de fogo do universo que por sua vez era invisível. Esse fogo central gerava o calor do Sol

e também para todo o universo.

Aristóteles (384-322 a.C.) explicou que as fases da Lua dependem da fração da área iluminada pelo Sol que está voltada para a Terra. Explicou, também, os eclipses. Aristóteles argumentou a favor da esfericidade da Terra, já que a sombra da Terra na Lua durante um eclipse lunar é sempre arredondada. Afirmava que o Universo é esférico e finito. Aperfeiçoou a teoria das esferas concêntricas, propondo seu livro *De Caelo*, que o universo é finito e esférico, ou não terá centro e não pode se mover.

Aristarco de Samos (310-230 a.C.) foi o primeiro a propor que a Terra se movia em volta do Sol, antecipando Copérnico em quase 2000 anos. Entre outras coisas, desenvolveu um método para determinar as distâncias relativas do Sol e da Lua a Terra e mediu os tamanhos relativos da Terra, do Sol e da Lua, usando argumentos geométricos.

Ptolomeu (100 d.C.-170 d.C.) foi o último astrônomo importante da antiguidade. Ele compilou uma série de treze volumes sobre astronomia, conhecida como o *Almagesto*, que é a maior fonte de conhecimento sobre a astronomia na Grécia.

A contribuição mais importante de Ptolomeu foi uma representação geométrica do sistema solar, geocêntrica, com círculos e epiciclos, que permitia prever o movimento dos planetas com considerável precisão e que foi usado até o Renascimento, no século XVI. Vemos na Figura 2 o epiciclo de Ptolomeu que representava o sistema solar e colocava a Terra no centro do sistema, e o Sol descrevendo uma órbita em torno da Terra.

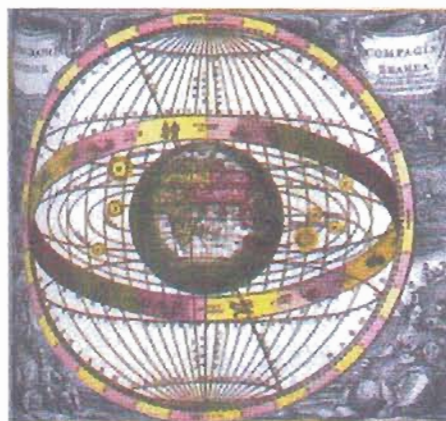


Figura 2 Epiciclo de Ptolomeu [2].

2.3 Astronomia Medieval

*Como? Será que não posso mais contemplar
o Sol e as estrelas? Será que não posso, sob
os céus, meditar sobre as verdades mais
preciosas.*

Dante Alighieri

Depois da humanidade ter experimentado os extraordinários avanços científicos da Antigüidade clássica houve um período obscuro de atraso cultural. Naquela época quem detinha o maior poder sobre o mundo era a Igreja Católica, pois era a única entidade presente em todo velho mundo. Era a Igreja que determinava o que era certo e o que era errado, o que devia e o que não devia ser de conhecimento do povo, na Figura 3 mostramos a representação do sistema solar na visão da Igreja Católica.

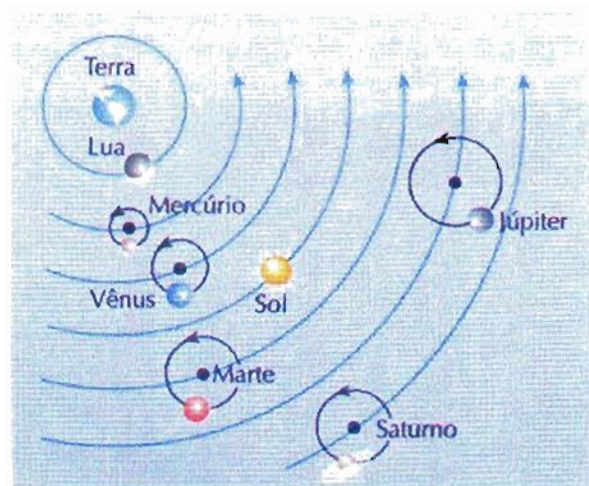


Figura 3 Visão da igreja do sistema solar [2].
(Medieval)

A Ciência deveria se sujeitar à fé para não ser considerada heresia e o geocentrismo passou a ser visto como verdade divina. Muitos que tentaram ser contra a ordem mundial foram queimados e chamados de bruxos.

Isso durou até que começaram a surgir comerciantes, primeiro nas cidades-estados italianas e depois no resto da Europa. À medida que foram enriquecendo esses comerciantes foram abalando o poder da Igreja, pois o comércio começou a substituir a ética religiosa. Com isso foram ressurgindo os estudiosos. O empirismo, aos poucos, voltou a aparecer e, após um longo

período de trevas, começou a contar com alguns avanços científicos.

2.4 Principais astrônomos do final da idade média

Nicolau Copérnico



(1473 - 1543) Nasceu na Polônia, onde estudou na Universidade de Cracóvia era Matemático e astrônomo, autor da Teoria Heliocêntrica, segundo a qual o Sol é o verdadeiro centro do sistema solar, sendo responsável pela sucessão de dias e noites, pelo movimento da rotação da Terra sobre seu próprio eixo, a Figura 4 representa o sistema de Copérnico que colocava o Sol no centro do sistema e a Terra orbitando o Sol.

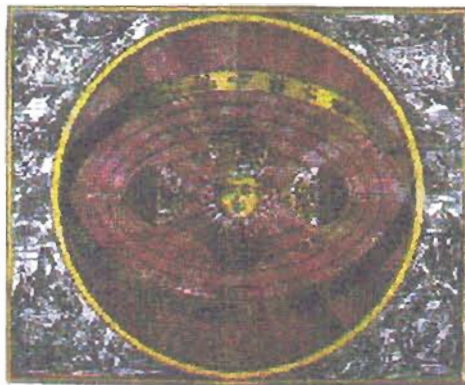


Figura 4. Representação do sistema de Copérnico [2].

Como sua verdadeira paixão era a astronomia, teve sua atenção despertada pelo planeta Marte, e de suas observações, veio-lhe as perguntas: Por que os planetas se tornavam cada vez maiores, mais brilhantes, ao longo de sua trajetória? Ou cresciam, o que parecia absurdo, ou ficavam tão mais perto da Terra? O que certamente, os levava a sair dos epiciclos, onde deveriam permanecer? Diante de suas dúvidas, Copérnico, com sua tranquilidade característica, passou a estudar os pensadores antigos, que ousaram dar um movimento à Terra, e colocar o Sol como centro do Universo. Depois de minuciosos cálculos matemáticos, ele deduziu: A Terra executa um movimento completo em torno de seu eixo. Isso explicaria o movimento do Sol e das estrelas, produzindo o dia e a noite. Novos cálculos o levaram a atribuir

ao Sol o movimento anual, que na verdade é executado pela Terra.

Em 1514 foi convidado a participar com outros astrônomos, em uma reforma no calendário. Copérnico recusou alegando que a reforma não funcionaria antes que maiores detalhes do movimento do universo fossem esclarecidos.

Suas afirmações eram contrárias às teorias geocêntricas, que afirmavam ser a Terra fixa, e que todos os demais astros, giravam em torno dela. A Igreja Católica fundamentava-se na teoria geocêntrica, e agia de modo bravio, contra qualquer conceito contrário a esta teoria. A teoria geocêntrica, também chamada de teoria, por ter sido elaborada por Ptolomeu. Durante 30 anos, Copérnico, analisando e suas próprias observações, concluiu sua teoria. Como uma de suas maiores características era ser prudente, de início, apresentou sua teoria como mera hipótese, já que naquela época eram comuns, as condenações por heresia.

Giordano Bruno



(1548 – 1600) Giordano Bruno nasceu em Nola, perto de Nápoles. Em 1562, muda-se para Nápoles. Dois anos mais tarde, em 1564, nasce Galileu Galilei. Em junho de 1565, Bruno veste o hábito clerical e toma-se doutor em teologia. Escreve e publica: *Ceia das Cinzas, Sobre a Causa, o Princípio e o Uno, Sobre o Infinito, o Universo e os Mundos e Despacho da Besta Triunfante*.

Giordano buscava Deus nas suas criaturas, oculto e fundido com elas. Para as autoridades religiosas isso era mais herético do que afirmar que o Sol seria centro do sistema planetário.

Em 1591 ele regressa à Itália, em Veneza, Bruno hospedou-se na casa de Mocenigo para ensinar-lhe a arte de memorizar. Mocenigo esperava conseguir do mestre um conhecimento misterioso que permitisse alcançar poder e fama, uma alquimia secreta, ocultismo ou proficiência em artes mágicas. Não eram essas as técnicas de Giordano Bruno e Mocenigo decepciona-se, entrega o professor ao tribunal do Santo Ofício.

Em 1592 é denunciado e preso pelo Santo Ofício (Santa Inquisição da Igreja Católica Romana), Bruno foi condenado em 1600, teve a língua arrancada e em seguida foi queimado vivo.

No dia 17 de fevereiro de 1600, no Campo di Fiore, em Roma, Filippo Giordano Bruno, ex-monge dominicano de 52 anos de idade, foi queimado vivo depois de cumprir sete anos de humilhante prisão numa masmorra. Seu crime: suas idéias sobre as ciências e a filosofia do conhecimento. Perante o Santo Ofício ele se recusou a abjurar essas convicções.

Se Giordano Bruno ainda não mereceu uma retratação póstuma por parte da Igreja Romana, é porque ele, ao contrario de Galileu, não abjurou as teorias progressistas de seu tempo. Giordano Bruno não pode ser calado pela Inquisição nem forçado a negar que há, no universo, uma quantidade infinita de estrelas, a probabilidade de existirem milhares de sóis e de seres inteligentes espalhadas pelo universo.

Tycho Brahe



(1546 - 1601) de família nobre da Dinamarca. Com 13 anos, Tycho foi estudar direito e filosofia na Universidade de Copenhague. Nesta época ocorreu um eclipse parcial do Sol, que havia sido previsto com exatidão. Tycho ficou muito impressionado que os homens soubessem o movimento dos astros com exatidão para poder prever suas posições.

Tycho propôs o seu próprio modelo do universo que era a Terra no centro, com o Sol em movimento circular à sua volta e os planetas orbitando o Sol.

Em 11 de novembro, de 1572 Tycho notou uma nova estrela na constelação de Cassiopéia, mais brilhante que Vênus. A estrela era tão brilhante que podia ser vista à luz do dia, e durou dezoito meses. Era o que hoje em dia se chama de uma supernova, um evento raro. Tycho tinha recém terminado a construção de um sextante. O sextante é um Instrumento óptico constituído de dois espelhos e uma luneta astronômica presos a um setor circular de 60°, muito mais preciso do que qualquer outro já construído até então, e demonstrou que a estrela se movia menos do que a Lua e os planetas em relação às outras estrelas e, portanto, estava na esfera das estrelas.

Em 1575 o Rei Frederico II, ofereceu-lhe uma ilha inteira. A Dinamarca pagaria a construção de um observatório, e os habitantes da ilha, cerca de 40 famílias, se tornariam seus súditos.

Foi o primeiro a instituir observações diárias, e não somente quando os

astros estavam em configurações especiais, descobrindo assim anomalias nas órbitas até então desconhecidas.

Tycho propôs seu próprio modelo, em que todos os planetas giravam em torno do Sol, com exceção da Terra. O Sol e a Lua, em seu modelo, giravam em torno da Terra.

Em 1599 ele chegou em Praga, onde o Imperador Rodolfo II o nomeou matemático imperial, e pôde continuar suas observações. Em 1600 contratou Johannes Kepler para ajudá-lo, e faleceu em 24 de outubro de 1601. Está enterrado na Igreja Tyn, em Praga.

Galileu



GALILEU GALILEI (Pisa, 1564-Arcetri, 1642), astrônomo e físico italiano. É considerado o fundador da ciência experimental moderna. Foi o primeiro a utilizar o telescópio. Galileu descobriu a lei que rege o movimento do pêndulo; também a ele é atribuída a descoberta da famosa lei da queda dos corpos. Galileu projetou o setor, instrumento de grande utilidade para os desenhistas; e aperfeiçoou o telescópio.

Nascido na cidade de Pisa em 15 de fevereiro de 1564, Galileu Galilei matriculou-se na Universidade de Pisa, onde começou a estudar medicina e a filosofia de Aristóteles.

Galileu abandonou a universidade em 1585, por falta de dinheiro. Dedicou-se então à pesquisa matemática. Durante esse período, inventou a balança hidrostática, que é utilizada para determinar o peso específico dos corpos, pesando-os na água.

Em 1592, Galileu tomou-se professor de matemática na Universidade de Pádua, onde ensinou durante 18 anos. Sua fama atraía estudantes de toda a Europa. No início de 1609, construiu muitos telescópios, vendidos em toda Europa. Eram telescópios maiores e mais potentes que os construídos até então como indicado na Figura 5 A.

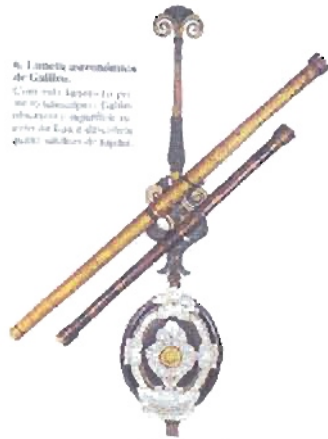


Figura 5 A. Telescópio de Galileu[2]



Figura 5B. Satélites de Júpiter [2]

As primeiras observações astronômicas importantes de Galileu tiveram como objeto a Lua, e entraram em choque com os ensinamentos de Aristóteles. Galileu descobriu que a Lua não era, uma esfera lisa dotada de brilho próprio. Observou que sua superfície era marcada por vales e montanhas e que a luz oriunda da Lua era refletida. Estudou também a Via Láctea; de acordo com as observações, ela era uma massa de estrelas "tão numerosas que a imaginação quase não podia concebê-las".

Sua descoberta mais sensacional ocorreu em 1610, quando assinalou a existência dos quatro satélites brilhantes de Júpiter como mostra a Figura 5B. Chamou esses satélites de estrelas dos Médicis, em homenagem à família Médicis, que governava a Toscana, onde ele nascera. Nesse mesmo ano, Galileu constatou a forma peculiar de Saturno.

Esses descobrimentos vieram fortalecer o sistema defendido por Copérnico e contribuíram para aumentar a fama de Galileu. Seus êxitos trouxeram-lhe também grandes problemas. Para a maioria dos dirigentes europeus, na época, era suspeita qualquer pessoa que ousasse pronunciar-se contra as crenças generalizadas, baseadas nos ensinamentos dos sábios antigos. Muitos homens da Igreja e seguidores de Aristóteles levantaram-se contra Galileu. Todavia, Cósmio II, membro da família Médicis e grão-duque da Toscana tornaram-se seu protetor. Convidou Galileu para ocupar o posto de matemático em Florença e na Universidade de Pisa. Galileu aceitou o convite.

Em Florença, Galileu observou as fases de Vênus (semelhantes às da Lua) e também uma fase indefinida de Marte. Em Roma, Galileu, usando um dos seus telescópios, mostrou ao Papa Paulo V e a outros importantes membros da Igreja as suas descobertas. Mas, a despeito das suas demonstrações, seguiu-se uma discussão entre homens da Igreja e cientistas.

A Igreja se opôs ferozmente à exposição feita por Galileu sobre as manchas solares.

Galileu sustentou firmemente a teoria defendida por Copérnico de que a Terra se move em torno do Sol. Os representantes da Igreja exortaram Galileu a renegar o sistema de Copérnico.

Em 1632, Galileu publicou sua obra-prima, *Diálogo Sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo*. O Santo Ofício, ou seja, a Inquisição, convocou-o imediatamente a comparecer diante dele. Após longo julgamento, os representantes da Igreja forçaram Galileu a abjurar publicamente sua crença na teoria de Copérnico e o condenaram a prisão por prazo indefinido. Mas, ao invés de encarcerá-lo, mantiveram-no confinados na casa que possuía em Florença. Galileu passou os últimos anos de sua vida escrevendo sobre as leis das forças e publicou *Diálogos Sobre as Duas Novas Ciências*.

Antes de publicar seus Diálogos, Galileu ficou cego. Viveu somente cinco anos mais, sempre, porém, sob a constante vigilância exercida pela Inquisição em sua casa. Foi enterrado na igreja da Santa Croce em Florença. Cinquenta anos após a sua morte, a cidade ergueu nessa igreja um monumento de consagração ao grande sábio.

Entre a Igreja Católica e a ciência houve diversos conflitos, mas nenhum deles obteve tanto destaque como o de Galileu. Depois de 360 anos de sua condenação (em 1992), o papa João Paulo II encerrou oficialmente o processo e a condenação que a igreja tinha imposto, e pediu desculpas pelo erro cometido.

Johannes Kepler



(1571-1630) Nasceu prematuro e fraco, aos quatro anos teve Variola e quase morreu, deixando as suas mãos deformadas, sofria constantemente de doenças de pele, que lhe criavam muitas feridas que sempre infeccionavam. Kepler foi beneficiado pelos fundos dados pela Igreja Protestante para continuar seus estudos.

Kepler buscava em seus estudos a simetria do universo, como as distâncias dos planetas, tentando explicar as distancias relativas dos planetas, assim como os números de planetas eram sólidos perfeitos (tetraedro, cubo,

octaedro, dodecaedro e icosaedro) que possuíam todos os lados iguais. Com isso as distâncias entre os planetas era automaticamente fixada pelo modo como os sólidos se encaixavam na esfera como mostra a Figura 6. Esse esquema era completamente absurdo e fisicamente insustentável

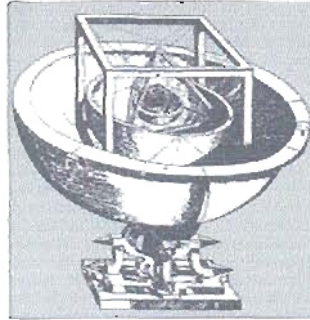


Figura 6 Representação sólidos perfeitos [6].

Depois de trabalhar alguns meses, em 1596 Kepler publicou *Mysterium Cosmographicum* (mistério cosmográfico). Nessa obra ele defendia o sistema de Copérnico e os cinco sólidos com uma mistura de misticismo e física rudimentar.

Em 19 de outubro de 1600, Kepler, abandonado por seus antigos mestres por suas convicções na teoria heliocêntrica de Copérnico, não aceitando os dogmas incondicionalmente, começou a trabalhar para Tycho Brahe em Praga. Em setembro de 1601 Kepler retornou a Praga, e Tycho já havia instalado seus instrumentos, que haviam sido trazidos de Hveen. Tycho o apresentou ao imperador, que o contratou como assistente de Brahe nas suas pesquisas.

Kepler começou a trabalhar no cálculo da órbita de Marte, e em 1602 descobriu a Lei das Áreas, mas não conseguiu conferir a forma da órbita. Se a órbita fosse circular, bastariam três observações, pois três pontos definem um círculo. Os pontos deveriam ser observados em oposição, já que em oposição é irrelevante se é a Terra ou o Sol que se movem, pois os três corpos estão alinhados. Tycho tinha observado 10 oposições de Marte entre 1580 e 1600, às quais Kepler depois adicionou as de 1602 e 1604. Naturalmente qualquer conjunto de três observações deveria resultar na mesma órbita. Como Marte é o planeta externo com maior excentricidade, dos conhecidos então, um círculo não conferia as observações. Mesmo introduzindo um equante Kepler não conseguia conferir as observações com erro menor que 8', enquanto a precisão das observações de Tycho eram da ordem de 1'.

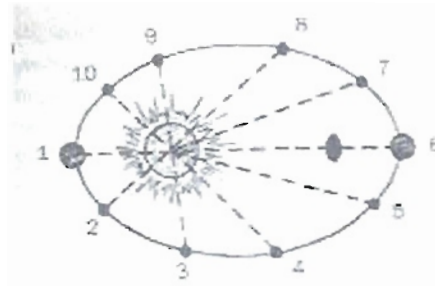


Figura 7 Representação das leis de Kepler [6].

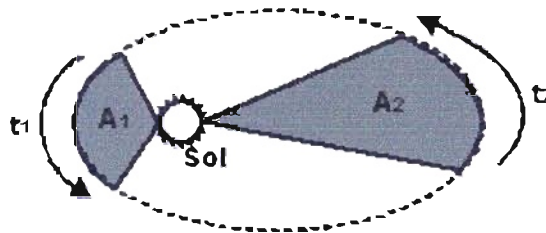
Na Figura 7 mostramos as duas primeiras leis de Kepler. Os números representam a posição do planeta em intervalos de tempos iguais, as áreas dos segmentos dos triângulos são iguais.

Em 1605 Kepler descobriu que a órbita era elíptica, com o Sol em um dos focos. Estes resultados foram publicados no *Astronomia Nova*, em 1609. Em 1604 Kepler completou o *Astronomiae pars Optica*, considerado o livro fundamental da ótica, onde explicou a formação da imagem no olho humano, explicou como funciona uma câmara escura, descobriu uma aproximação para a lei da refração, estudou o tamanho dos objetos celestes e os eclipses.

Em 1610 Kepler leu o livro com as descobertas de Galileu usando o telescópio, e escreveu uma longa carta em suporte publicada como *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* (Conversa com o Mensageiro Sideral). Em agosto de 1610 ele usou um telescópio dado por Galileu ao duque da Bavária, Ernst de Cologne, para observar os satélites de Júpiter, publicando *Narratio de Observatis Quatuor Jovis Satellitibus* (Narração das Observações dos Quatro Satélites de Júpiter). Estes tratados deram grande suporte a Galileu, cujas descobertas eram negadas por muitos. Os dois trabalhos foram republicados em Florença.

Até onde Kepler explicara, as órbitas elípticas eram apenas hipóteses, enquanto tal, repulsiva, na medida em que elipses são menos perfeitas que círculos. Tendo descoberto quase por acidente que as órbitas elípticas se adequavam às observações, ele não pôde reconciliá-las com sua idéia de que os planetas tinham sido feitos para girar em torno do Sol, atraídos pela força magnética.

Em 1621 Kepler completou a sua mais extensa obra, a *Epítome da Astronomia Copernicana*. A igreja classificou o livro como proibido, mesmo assim o livro foi o mais popular nos 100 anos seguintes. Em 15 de novembro de 1630, sofrendo de altíssima febre e de acordo com testemunha local, em



Representação da lei das áreas [9].

Observe que as distâncias escalares percorridas pelo planeta variam de acordo com a posição, portanto as velocidades também variam proporcionalmente, quanto mais próximo do Sol, maior a velocidade escalar, e quanto mais distante do Sol, menor a velocidade escalar. Ver a Figura 9.

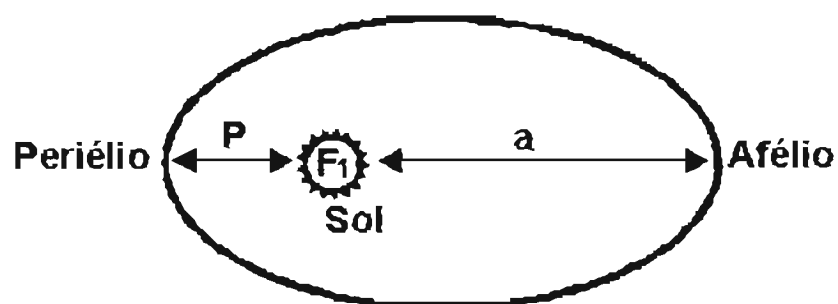
Para a Terra, o máximo e o mínimo da velocidade são 30,2 km/s na posição mais próxima do Sol e 29,3 km/s na mais afastada do Sol.

O ponto mais próximo do Sol chama-se periélio e o mais afastado chama-se afélio. O planeta é mais veloz no periélio e mais lento no afélio.

O planeta, em seu movimento de translação ao redor do Sol, constitui um sistema conservativo, no qual a energia mecânica permanece constante. Ao se deslocar do periélio para o afélio em movimento retardado, a energia cinética diminui, provocando aumento da energia potencial gravitacional.

3ª Lei ou Lei dos Períodos

Para qualquer planeta do Sistema Solar, o quociente do cubo do raio médio da órbita pelo quadrado do período de revolução em torno do Sol é constante.



$$R = \frac{a + P}{2}$$

$$\frac{R^3}{T^2} = K$$

Figura 10 Representação da lei dos períodos [9].

seu delírio tudo que ele fazia era apontar seu dedo indicador ora para sua testa, ora para o céu, não resistiu e morreu. Seu tumulto foi destruído na guerra dos trinta anos e seus restos mortais, condenados a errar para sempre, mas seu epitáfio foi conservado, e nele dizia:

*Eu medi os céus, agora, as sombras eu meço.
Para o firmamento viaja a mente, na terra
descansa o corpo.*

2.5 As leis de Kepler

1ª Lei ou Lei das órbitas

Os planetas descrevem órbitas elípticas em torno do Sol, que ocupa um dos focos da elipse descrita.

A 1ª Lei de Kepler não exclui a possibilidade da existência de órbitas circulares, já que a circunferência é um caso particular de elipse, a elipse nada mais é do que uma circunferência alongada, no caso da circunferência os focos são coincidentes. A órbita da Terra, por exemplo, é quase circular. Na Figura 8 mostramos um esquema para ilustrar a órbita de um planeta.

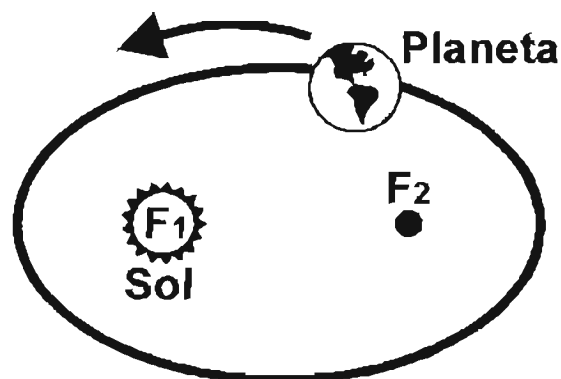


Figura 8 Representação da lei das órbitas [9].

2ª Lei ou Lei das Áreas

Os segmentos imaginários que une o centro do Sol e o centro dos planetas varrem áreas proporcionais em intervalos de tempo iguais, não importando a posição do planeta em sua órbita.

De acordo com a 3ª Lei, o período de revolução (ano) cresce com a distância do planeta ao Sol. Planetas próximos ao Sol possuem pequeno raio orbital, conseqüentemente, um ano de curta duração, enquanto os planetas mais afastados do Sol possuem raio orbital maior e, portanto, um ano de maior duração. Ver a Figura 10.

As Leis de Kepler aplicam-se a quaisquer corpos que gravitam em órbita de uma grande massa central, por isso elas são aplicáveis a quaisquer “sistemas solares” do Universo e também aos satélites naturais ou artificiais em órbita ao redor dos planetas.

3 GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Neste capítulo apresentamos inicialmente uma evolução histórica dos conceitos que deram origem à lei da gravitação universal. Começaremos apresentando uma breve biografia de Isaac Newton, considerado um dos maiores cientistas de seu tempo, com a sua lei da gravitação universal e as suas principais aplicações. Para encerrar este capítulo iremos realizar um estudo da física moderna da gravitação universal com destaque para Albert Einstein.

3.1 Evolução Histórica

Newton

A natureza e suas leis escondiam-se na escuridão.

E Deus disse: "Faça-se Newton", e tudo se iluminou.

Alexander Pope



(1642-1727) Isaac Newton nasceu em 4 de janeiro de 1642 (ano da morte de Galileu) em Woolsthorpe, Lincolnshire, Inglaterra. Newton veio de uma família de agricultores, mas seu pai morreu antes de seu nascimento. Ele foi criado por sua avó. Um tio o enviou para o Trinity College, Cambridge, em Junho de 1661. O objetivo inicial de Newton em Cambridge era estudar direito. Em Cambridge ele estudou a filosofia de Aristóteles, a nova álgebra e geometria analítica de Viète, Descartes, e a mecânica da astronomia de Copérnico e Galileu, e a óptica de Kepler o atraíram.

Seu gênio científico despertou quando uma epidemia de peste fechou a Universidade no verão de 1665, e ele retornou a Lincolnshire. Só em Londres, a peste vitimou mais 70.000 pessoas. Lá, em um período de menos de dois anos, Newton que ainda não tinha completado 25 anos, iniciou a revolução da matemática, óptica, física e astronomia.

Durante sua estada em casa, ele lançou a base do cálculo diferencial e integral. O "*método dos fluxions*", como ele o chamava, estava baseado na

descoberta crucial de que a integração de uma função é meramente o procedimento inverso da diferenciação. Seu livro *De Methodis Serierum et Fluxionum* foi escrito em 1671, mas só foi publicado quando John Colson o traduziu para o inglês em 1736. Newton, com apenas 27 anos, foi nomeado para sua posição, por indicação do anterior, por seus trabalhos em cálculo integral, onde Newton havia feito progresso em um método geral de calcular a área delimitada por uma curva.

Seu trabalho mais importante foi em mecânica celeste, que culminou com a Teoria da Gravitação Universal. Em 1666 Newton tinha versões preliminares de suas três leis do movimento. Ele descobriu a lei da força centrípeta sobre um corpo em órbita circular.

O cometa brilhante que apareceu em 1664 foi observado por Adrien Auzout no Observatoire de Paris, Christian Huygens na Holanda, Johannes Hevelius em Danzig, e Robert Hooke na Inglaterra. Qual seria sua órbita? Tycho Brahe tinha suposto circular, Kepler dizia que era em linha reta, com a curvatura devido à órbita da Terra, mas as observações indicavam que a órbita fosse intrinsecamente curva, e Johannes Hevelius propôs que fosse elíptica. Em 1665 o francês Pierre Petit, em sua dissertação sobre a Natureza dos Cometas propôs pela primeira vez que suas órbitas fossem fechadas, e que os cometas de 1618 e 1664 poderiam ser o mesmo cometa. Vinte anos mais tarde Halley especulou sobre o problema da gravitação em relação aos cometas. Sem conseguir resolver o problema, em agosto de 1684 ele propôs o problema a Newton. Newton disse que já havia resolvido o problema muitos anos antes, e que todos os movimentos no sistema solar poderiam ser explicados pela lei da gravitação. Um cometa na constelação de Virgem em 1680 tinha uma órbita claramente curva. Em 1682 um cometa ainda mais brilhante, que mais tarde levaria o nome de Halley, teve sua órbita bem determinada por Halley, usando a teoria de Newton.

A idéia genial de Newton em 1666 foi imaginar que a atração gravitacional da Terra era contrabalançada pela força centrípeta da Lua. Com sua lei para a força centrípeta e a terceira Lei de Kepler, Newton deduziu a lei da atração gravitacional.

Em 1679 Newton provou que a Lei das Áreas de Kepler é uma consequência da força centrípeta, e também que a órbita é uma elipse, para um corpo sob uma força central em que a dependência radial varia com o

inverso do quadrado da distância ao centro.

Halley persuadiu Newton a escrever um trabalho completo sobre sua nova física e sua aplicação à astronomia, e em menos de dois anos Newton tinha escrito os dois primeiros volumes do *Principia*, com suas leis gerais, mas também com aplicações a colisões, o pêndulo, projéteis, atrito do ar, hidrostática e propagação de ondas. Somente depois, no terceiro volume, Newton aplicou suas leis ao movimento dos corpos celestes. Em 1687 é publicado o *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ou *Principia*, como é conhecido, vemos na Figura 11 a capa do livro.

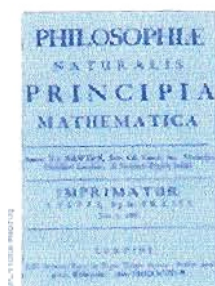


Figura 11 Capa do livro de Newton: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*[2].

O *Principia* é reconhecido como um dos livros científicos mais importantes. Newton analisou o movimento dos corpos em meios resistentes e não resistentes sob a ação de forças centrípetas. Os resultados eram aplicados a corpos em órbita, e queda-livre perto da Terra. Ele também demonstra que os planetas são atraídos pelo Sol pela Lei da Gravitação Universal, e generalizou que todos os corpos celestes atraem-se mutuamente. Newton explicou uma ampla gama de fenômenos até então não correlatos: a órbita excêntrica dos cometas; as marés e suas variações; a precessão do eixo da Terra e o movimento da Lua perturbado pela gravidade do Sol.

Newton já explicava que o movimento de três corpos sob uma força central só pode ser resolvido por aproximação, que a Lei da Gravitação Universal trata os corpos como pontos, e que os planetas não são pontos, nem ao menos esféricos, que o movimento das marés introduz perturbações no cálculo das órbitas, as quais precisam ser calculadas por aproximações.

Depois de sofrer um colapso nervoso em 1693, Newton abandonou a pesquisa para uma posição no governo em Londres, tomando-se Guardiã da Casa da Moeda Real (1696) e Mestre (1699).

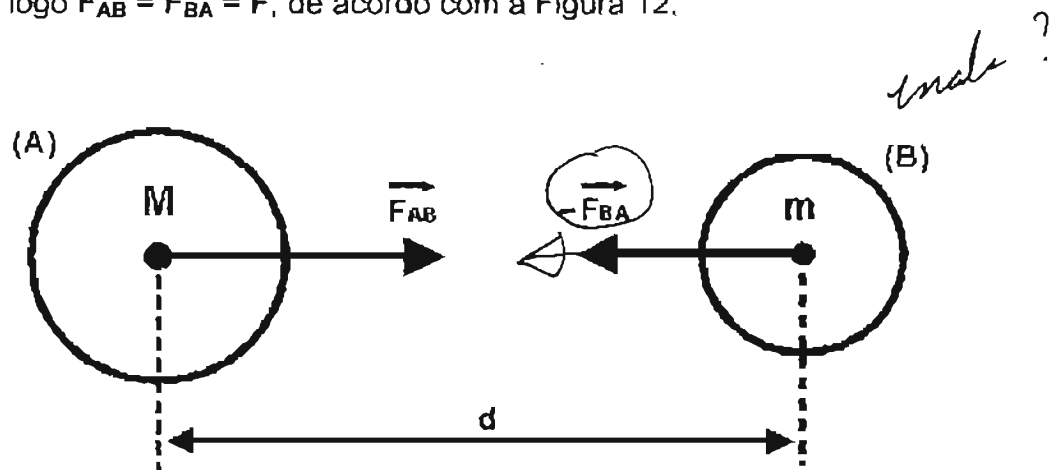
Em 1703 foi eleito presidente da Sociedade real, e foi re-eleito a cada ano até sua morte. Foi agraciado com o título de cavaleiro (Sir) em 1708 pela Rainha Anne, o primeiro cientista a receber esta honra. Morreu em 31 de março de 1727 em Londres, Inglaterra.

3.2 Força Gravitacional

A força gravitacional é a mais fraca das quatro forças fundamentais da física (força forte, força eletromagnética, força fraca e força gravitacional). A gravidade é uma propriedade de todos os corpos. Sua intensidade decresce com a distância e é proporcional à massa: quanto mais massa possui um objeto, maior é a força de atração entre os corpos próximos.

A Terra exerce uma forte atração gravitacional, pois possui uma enorme massa. Ela atrai a maçã que cai da árvore, no entanto, a maçã também atrai a Terra, embora a pequena fruta possui uma massa tão insignificante em relação à Terra que seus efeitos não são percebidos.

De acordo com a terceira lei de Newton, F_{AB} e F_{BA} são forças de ação e reação, logo $F_{AB} = F_{BA} = F$, de acordo com a Figura 12.



onde G é a constante de gravitação universal

$$F = G \frac{M m}{d^2}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

Figura 12 Representação da lei da gravitação [9].

3.3 Energia Potencial Gravitacional

Ao deslocarmos um corpo radialmente em relação ao campo gravitacional de um planeta, observamos que quanto maior a distância até o planeta, menor será a atuação do campo gravitacional, então a variação de energia potencial gravitacional entre dois pontos corresponde à diferença de energia potencial entre esses dois pontos.

Para calcularmos a energia potencial em um ponto qualquer do campo gravitacional, vamos analisar a variação de energia entre um ponto situado na superfície da Terra, onde a distância ao centro de massa da Terra será o próprio raio, e outro ponto localizado no infinito, onde a energia potencial será praticamente nula. Na Figura 13 ilustramos a definição de energia potencial gravitacional.

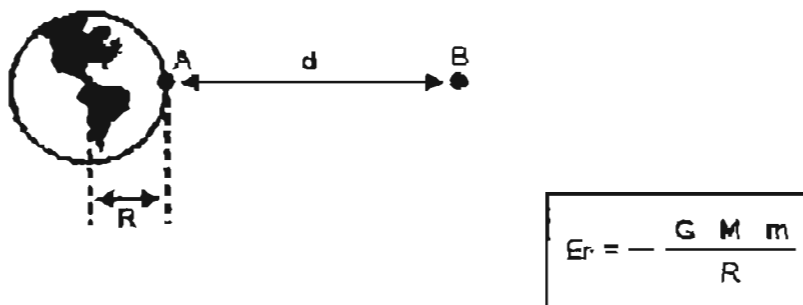


Figura 13 Representa o conceito de energia potencial gravitacional [9].

Massa e Peso

Falamos freqüentemente de massa e peso como se fossem sinônimos. Existe, entretanto, uma notável diferença entre os dois conceitos. Massa é a quantidade de matéria contida em um corpo; sua unidade de medida no sistema internacional é o quilograma. A massa do Sol, por exemplo, é 330.000 vezes maior que a da Terra. A massa pode ser calculada através de uma balança de pratos, que se baseia na comparação da massa contida em um objeto com uma massa de referência. Considerando que a massa não sofre a influência da gravidade, seu valor é sempre o mesmo, independente do lugar onde se encontra o objeto: em qualquer parte da Terra, na Lua ou em qualquer ponto do espaço.

O peso, em contrapartida, depende da gravidade e pode ser determinado

por meio de uma balança de mola, que funciona de acordo com a atração gravitacional. A gravidade da Lua corresponde a aproximadamente um sexto da gravidade da Terra. Se nos encontrássemos na Lua, nossa massa seria a mesma, mas pesariamos seis vezes menos do que na Terra. Na Fig. 14 mostramos uma balança de braços iguais, geralmente usada para se medir massas, por comparação com massas calibradas.

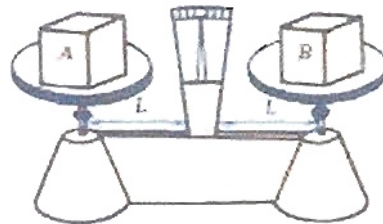


Figura 14: Representa a medida das massas [2].

3.4 Aceleração da Gravidade

Newton descobriu também que todos os corpos experimentam a mesma aceleração e que, quanto maior a sua massa, maior é a força necessária para acelerá-los. Por exemplo, um martelo de 7 kg sofre uma força gravitacional mil vezes maior que uma pena de 7 g. Apesar disso, como a sua massa é mil vezes maior, sua aceleração é a mesma.

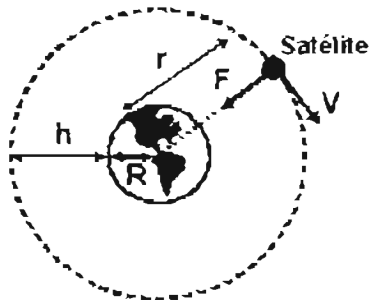
A dedução da fórmula da força peso, que atua sobre corpos em queda livre mostra que o peso depende somente da gravidade e não das respectivas massas para adquirir a sua aceleração de queda.

Com essa demonstração podemos explicar que se não houvesse atmosfera, uma pena e um martelo cairiam com a mesma aceleração.

$$F_g = G \frac{mm_T}{r^2} \hat{r} \quad P = mg = G \frac{mm_T}{R^2} \quad \rightarrow \quad g = \frac{Gm_T}{R^2}$$

Satélites

Considere um satélite em órbita circular ao redor da Terra, em movimento circular uniforme. Na Fig.15 mostramos um esquema desta situação.



r = raio da órbita do satélite
 R = raio da Terra
 M = massa da Terra
 m = massa do satélite
 h = altitude

Figura 15 Representa a órbitas dos satélites [9]

Velocidade Orbital (v)

A força de atração gravitacional que o satélite recebe da Terra é a força resultante centrípeta do movimento circular uniforme:

$$v = \sqrt{\frac{G M}{R+h}}$$

Observe que v independe da massa do satélite.

Período de Revolução (T)

Como o satélite realiza movimento uniforme:

$$V = \frac{2\pi r}{T} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{2\pi r}{V}$$

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{\sqrt{\frac{G M}{r}}} \quad \Rightarrow \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{G M}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{G M}}}$$

O período de revolução T também não depende da massa do satélite.

Satélites Geoestacionários

Recebem essa denominação pelo fato de se apresentarem "parados" em relação a um referencial da Terra, ou seja, giram com a mesma velocidade angular da Terra, portanto o período de revolução dos satélites geoestacionários corresponde ao período de revolução da Terra, que é de 24 horas.

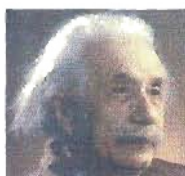
Os satélites geoestacionários são utilizados principalmente em pesquisas e telecomunicações ou entre continentes.

3.5 A teoria moderna da gravitação universal

Começamos esta sessão apresentando uma breve biografia de Einstein. Veremos as suas principais teorias como a relatividade geral e algumas aplicações na física moderna.

*A política é para o momento,
mas uma equação é para a eternidade.*

Albert Einstein (? ano)



Albert Einstein nasceu em 1879 em Ulm, Alemanha. Em 1894 devido aos negócios do pai, mudou-se com a família para Milão, Einstein demorou no seu desenvolvimento, só aprendeu a falar com três anos, e muitas pessoas achavam que se tratava de um menino com problemas mentais. Era considerada uma criança muito independente e costumava viver em seu mundo de fantasias, tanto que seu pai comentava que ele tinha extrema facilidade de se desligar do mundo real.

O mito de que era um estudante medíocre é falso, suas notas eram em geral bem altas. Einstein sempre teve problema com a rígida e autoritária estrutura educacional do sistema alemão.

Seu interesse sobre ciências ficou profundo quando, aos 12 anos encontrou um livro sobre geometria euclidiana. Ficou fascinado com o poder do raciocínio de provar proposições complicadas. Dali em diante, começou a devorar livros de física e matemática. Formou-se pela Escola Politécnica Federal em Zurique na Suíça em 1900. Dois anos depois, começou a trabalhar como assistente no departamento suíço de patentes em Berna.

Em 1905 trabalhando no departamento suíço de patentes publicou quatro artigos que revolucionaram a física e o tornou um dos maiores físicos do mundo, e mudaram a nossa compreensão de espaço e tempo. O primeiro tratava do chamado movimento browniano, o zigue-zague feito pelas partículas em suspensão num líquido. Einstein mostrou como esse movimento permitia compreender a natureza das moléculas. No segundo, formulou uma nova teoria

↓ EFEITO FOTO ELÉTRICO

da luz, com o importante conceito de fóton, baseando-se na teoria quântica proposta em 1900 pelo físico Max Planck; no terceiro, expôs a formulação inicial da teoria da relatividade e no quarto trabalho, propôs uma fórmula para a equivalência entre massa e energia, a célebre equação $E = mc^2$, que pode ser considerada uma das equações mais conhecidas; na Figura 17 ilustramos essa famosa equação.

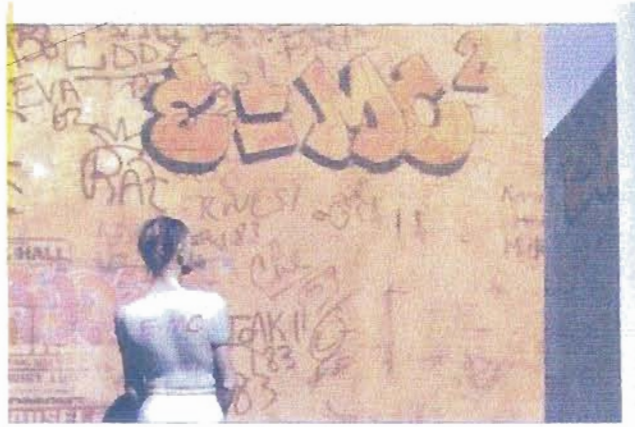


Figura 17 Ilustração da equação de Einstein [8].

Cada vez mais respeitado no meio acadêmico, sua grande preocupação era a generalização da teoria da relatividade, com a elaboração de uma nova teoria capaz de interpretar, por meio de considerações semelhantes, o campo eletromagnético e o campo gravitacional, que acabaria por receber a denominação de teoria do campo unificado. Em 1916, o cientista publicou *Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie* (Fundamento Geral da Teoria da Relatividade), formulação final da teoria geral da relatividade. Nesse mesmo ano, passou a manifestar uma preocupação com os problemas sociais que o acompanharia ao longo de toda a sua carreira.

Em 1919, Einstein tornou-se conhecido em todo o mundo, depois que sua teoria foi comprovada em experiências realizadas durante um eclipse solar. Por essa época começou a viajar pelo mundo, não apenas para expor suas teorias físicas, mas também para debater problemas como o racismo e a paz mundial. Em 1925, Einstein visitou o Brasil. Em 1921, ganhou o Prêmio Nobel de física pelo estudo do fóton e não pela relatividade. No mesmo ano, publicou *Über die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie Gemeinverständlich* (Sobre a Teoria da Relatividade Especial e Geral), obra de divulgação. A noção de equivalência entre massa e energia, e outras descobertas de Einstein provocaram uma verdadeira renovação do pensamento humano.

Em 1933, um ano após visitar universidades e instituições de pesquisas

maneira
reparar

Velocidade

c

Para
Paul

nos Estados Unidos, Einstein renunciou a seus cargos na Alemanha, onde os nazistas já estavam no poder, e fixou residência em território americano. Passou a ensinar no Instituto de Estudos Avançados da Universidade de Princeton, do qual se tornaria diretor. Em 1940 adotou a cidadania americana.

Durante esse período, o desenvolvimento de armas nucleares e as manifestações cada vez mais freqüentes de racismo no mundo constituíram as principais preocupações de Einstein. Ele escreveu uma carta ao presidente Franklin Roosevelt em que alertava para o risco que significaria para a humanidade a utilização pelos nazistas da tecnologia nuclear na fabricação de armas de grande poder destrutivo. Logo após receber a mensagem, o chefe de estado americano deu início ao projeto Manhattan, que tornou os Estados Unidos pioneiros no aproveitamento da energia atômica em todo o mundo e resultou na fabricação da primeira bomba atômica.

Embora não tivesse participado do projeto e sequer soubesse que uma bomba atômica tinha sido construída até que Hiroxima fosse arrasada, em 1945, o nome de Einstein passou para a história associado ao advento da era atômica. Durante a segunda guerra mundial, ele participou da organização de grupos de apoio aos refugiados e, terminado o conflito, após o lançamento de bombas atômicas em Hiroxima e Nagasaki, uniu-se a outros cientistas que lutavam para evitar nova utilização da bomba. Intensificando a militância pacifista, defendeu particularmente o estabelecimento de uma organização mundial de controle sobre as armas atômicas. Einstein foi muito criticado por sua teoria da relatividade, pois estava sendo acusado pela fabricação da bomba atômica. Quando ficou sabendo da publicação de um livro intitulado *Authors Against Einstein* (Cem Autores Contra Einstein), respondeu: "Por que cem? Se eu tivesse errado, um teria sido suficiente". Em 1945, renunciou ao cargo de diretor do Instituto de Estudos Avançados da Universidade de Princeton.

Em 1952, Einstein recebeu um convite para ser presidente de Israel, isso demonstra a popularidade que o cientista tinha, ao recusar o convite disse "Eu conheço um pouco sobre a natureza, mas quase nada sobre o homem".

A intensa atividade intelectual de Einstein resultou na publicação de grande número de trabalhos, entre os quais vale destacar *Warum Krieg?* (1933; Por que a Guerra?), em colaboração com Sigmund Freud; *Mein Weltbild* (1949; O Mundo Como eu o Vejo). A principal característica de sua obra foi uma

síntese do conhecimento sobre o mundo físico, que acabou por levar a uma compreensão mais abrangente e mais profunda do universo. Suas descobertas tornaram possível entender o comportamento das partículas com grande velocidade e suas respectivas leis.

Albert Einstein morreu em Princeton, em 18 de abril de 1955.

“O mundo mudou bem mais nos últimos cem anos do que em qualquer século anterior. Não por doutrinas políticas ou econômicas, mas por causa do imenso processo tecnológico possibilitado pelos avanços na ciência básica. Quem simboliza melhor esses avanços do que Albert Einstein?”[6].

Stephen Hawking

3.6 Relatividade Geral

Em 1907, Einstein, ponderou que a maioria dos movimentos que observamos na natureza não ocorrem com velocidades constantes, mas envolvem acelerações. Ele perguntou, como uma pessoa que estivesse caindo livremente de uma certa altura veria o mundo. Certamente, essa pessoa não sentiria o próprio peso.

Vamos imaginar uma pessoa dentro de um elevador parado no primeiro andar, ela sente o seu peso normal, devido à atração gravitacional. Suponha que o elevador suba de uma forma muito acelerada, a pessoa sente-se muito mais pesada do que o normal. O elevador volta a ter velocidade constante. De repente, as cordas do elevador se arrebentam, e o elevador começa a despencar, com a sua velocidade aumentando com uma aceleração constante e igual à da gravidade (queda livre). A pessoa irá perceber que os seus pés não estão tocando o chão, e não sentirá o próprio peso, como acontece com os astronautas quando estão em órbita em torno da Terra.

A experiência descrita demonstra como a aceleração pode imitar os efeitos da gravidade. Se o elevador estiver em repouso ou velocidade constante, você sente o seu peso normal. Se houver uma aceleração em relação à Terra, isso resultará em um acréscimo na força exercida sobre os seus pés. Quanto maior a aceleração vertical do elevador para cima, mais pesado você se sente, como se a atração gravitacional da Terra se tornasse mais forte.

Se essa mesma pessoa estivesse em uma espaçonave igual ao elevador em que estava sem saber, e essa espaçonave estiver acelerando através do espaço com uma taxa igual ao da gravidade terrestre, a pessoa terá a sensação que o elevador está parado ou movimento uniforme. Se o motor da espaçonave for desligado, a sensação será que o elevador está em queda livre. Na Figura 18 representamos ~~a~~ mostramos dos efeitos da gravidade em um elevador.



Figura 18 Representação dos efeitos que simulam a gravidade [8].

Einstein concluiu que não é possível distinguir entre um movimento acelerado e a aceleração causada pela gravidade. Essa equivalência entre a gravidade e a aceleração é conhecida como princípio da equivalência.

Einstein teve a sensibilidade de perceber que a equivalência funcionaria como se a geometria do espaço-tempo fosse curva, e não, plana, como se tinha suposto. Sua idéia era que massa e energia deformariam o espaço-tempo de alguma maneira. Objetos como maçã e planetas tentariam mover-se em linha reta através do espaço-tempo, mas suas trajetórias pareciam arqueadas por um campo gravitacional porque o espaço-tempo é curvo como vemos na Figura 19.

Então a atração gravitacional entre dois corpos maciços pode ser interpretada como sendo a curvatura desse espaço ao redor dos corpos. Quanto maior a massa do corpo, maior será a curvatura do espaço ao seu redor e, portanto maior será a atração gravitacional sobre outros corpos.

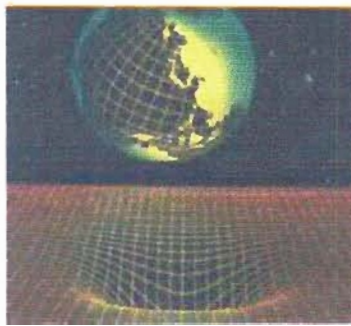


Figura 19: Representação da deformação no espaço criado pela massa dos corpos [10].

Um exemplo consiste em colocar uma bola de boliche sobre um colchão, que ficará deformado em volta da bola. Se atirmos bolinhas de gude perto da bola de boliche, suas trajetórias serão curvas de acordo com a deformação em que a bola de boliche aplica sobre o colchão. Mais ainda, a geometria do colchão provoca uma aceleração nas bolas de gude. Einstein equacionou tal aceleração com a deformação da geometria do espaço mostrando que, para massas relativamente pequenas, entre eles, planetas, seus resultados produzem perfeitamente os resultados da física newtoniana. E os efeitos causados pela curvatura do espaço previsto pela teoria da relatividade geral só são relevantes perto de corpos com massas bem grandes, como o Sol.

Outra consequência do espaço curvo de Einstein é a luz das estrelas que chegam até nós. A luz de uma estrela passando perto do Sol é desviada pela forma como a massa do Sol curva do espaço-tempo, produzindo uma pequena mudança na posição aparente da estrela, conforme ela é vista na Terra, como mostra a Figura 20.

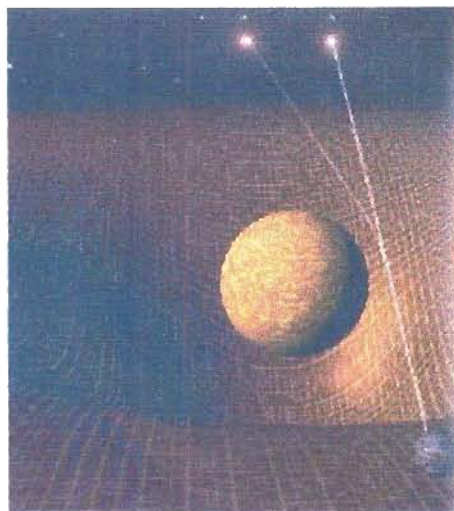


Figura 20: Mostra o desvio do raio de luz sofrido pelo efeito da gravidade [8].

Mercúrio

Na Mitologia Romana, Mercúrio é o deus dos comerciantes e dos ladrões, correspondendo ao deus Hermes o mensageiro dos deuses - da mitologia grega. O planeta provavelmente recebeu esse nome pelo fato de mover-se rapidamente no espaço.

A órbita de Mercúrio é altamente excêntrica; no periélio, o planeta está apenas a 46 milhões de quilômetros do Sol, mas no afélio encontra-se a 70 milhões. O periélio de sua órbita ao redor do Sol tem uma velocidade muito baixa. Os astrônomos do século XIX fizeram observações bastante cuidadosas sobre os parâmetros orbitais de Mercúrio, mas não puderam explicá-los adequadamente usando a mecânica newtoniana. As pequenas diferenças entre os valores observados e os valores previstos, intrigou os astrônomos por muitas décadas. Pensava-se que um outro planeta (às vezes chamado de Vulcano) poderia existir numa órbita próxima a de Mercúrio, assim justificando tal discrepância. A verdadeira resposta revelou-se muito mais dramática: A Teoria Geral da Relatividade, de Einstein. O fato de a sua teoria poder determinar corretamente os movimentos de Mercúrio foi importante para sua aceitação inicial.

Até 1962, pensava-se que o "dia" mercuriano tinha a mesma duração do ano mercuriano, justificando-se assim o fato de o planeta manter a mesma face voltada para o Sol, como acontece com a Lua em relação à Terra. Mas, em 1965, observações feitas com o radar Doppler mostraram que isso era falso. Sabe-se agora que Mercúrio gira em torno de seu eixo três vezes a cada dois

anos mercurianos.

Esse fato e a grande excentricidade da órbita de Mercúrio produziriam efeitos bastante estranhos para um observador na superfície do planeta. Em algumas longitudes, o observador veria o Sol nascer e, então, gradualmente, aumentar de tamanho aparente, à medida que se movesse lentamente em direção ao zênite. Nesse ponto, o Sol interromperia a sua trajetória, inverteria brevemente seu curso no céu, parando novamente antes de retomar sua caminhada em direção ao horizonte e diminuir de tamanho aparente. Durante toda essa trajetória, as estrelas estariam se movendo três vezes mais rápido através do espaço. Observadores em outros pontos da superfície de Mercúrio veriam movimentos diferentes, embora igualmente bizarros.

Buraco Negro

Quando um corpo não possui mais pressão suficiente para produzir uma força para fora que contrabalance o peso de suas camadas externas (Figura 21), o corpo colapsa matematicamente a um ponto! Isto é chamado de singularidade (um corpo com densidade tendendo ao infinito no qual um pequeno corpo conteria a massa de centenas de sóis). O campo gravitacional é tão forte que nem mesmo a luz é capaz de escapar dele e por isso tal corpo é chamado de buraco negro.

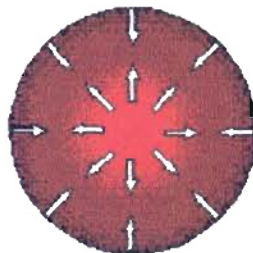


Figura 21 Forças internas se equilibrando [10].

Para que um corpo de massa m escape ao campo gravitacional de um corpo de massa M tem-se que a energia cinética de lançamento de m deve ser igual a sua energia potencial no infinito como vimos na parte teórica. Então temos:

$$v = (2GM/R)^{1/2}$$

onde v é a velocidade de escape, G é a constante gravitacional e R é o raio do corpo. Daí podemos tirar alguns resultados para corpos conhecidos:

Para a Terra $v = 11,2$ km/s

Para o Sol $v = 618$ km/s

Partindo da equação anterior podemos substituir v_e por c (velocidade da luz) e isolar o raio. Dessa forma encontraremos o raio em que a velocidade de escape é igual à velocidade da luz. Este raio é denominado de *Raio de Schwarzschild* que delimita o *horizonte de eventos*.

$$R_{Sch} = 2GM/c^2$$

Esta fronteira é chamada de horizonte de eventos porque nenhuma informação sai de dentro dela. Qualquer corpo que assumir um tamanho menor do que o do seu horizonte de eventos irá colapsar a um ponto.

Observamos que o raio de Schwarzschild é proporcional à massa do corpo colapsado. Podemos calcular seu valor para diferentes massas. Assim:

Para um corpo com a massa do Sol, temos que $R_{Sch} = 3$ km

Para corpos com duas massas solares, $R_{Sch} = 6$ km

Para a Terra, $R_{Sch} = 8.9 \times 10^{-3}$ m ou 8,9 mm

Curiosamente, a expressão clássica que obtivemos para R_{Sch} coincide a relação obtida pela Teoria da Relatividade Geral. De acordo com a referência [11] esta coincidência ocorreu devido a dois erros, que se compensaram: Um deles é expressão da energia cinética e o outro da energia potencial.

A primeira expressão para a velocidade de escape indica na equação $v = (2gm/r)^{1/2}$ também sugere que o corpo com massa M pode se converter em um buraco negro caso seu raio R seja menor que seu raio crítico. Como determinar este raio crítico? Você pode pensar que podemos responder a esta pergunta simplesmente substituindo $v=c$ na equação. Na realidade, esse procedimento fornece uma resposta correta, mas somente por causa de dois erros que se compensam. A energia cinética da luz não é dada por mc^2 , a energia potencial gravitacional nas vizinhanças de um buraco negro não é dada pela equação 12.9. Em 1916, Karl Schwarzschild usou a teoria da relatividade geral de Einstein (em parte uma generalização e extensão da teoria newtoniana da gravitação) para deduzir uma expressão para o raio crítico R_{SCH} atualmente

chamado de raio de Schwarzschild. Verifica-se que o resultado é igual ao obtido quando substituímos $v=c$ na equação.

O Desvio para o Vermelho Causado pelo Campo Gravitacional

Outro efeito interessante é que fortes campos gravitacionais podem provocar sobre a radiação a alteração de seu comprimento de onda. A radiação que emana de um corpo com um campo gravitacional forte sofre um aumento do seu comprimento de onda (ou redução da frequência). Dessa forma as raias características de cada elemento que se encontram nas proximidades de um campo gravitacional forte serão encontradas deslocadas das suas frequências originais, no sentido de menores frequências ou maiores comprimentos de onda. Para a luz visível, isso significa que a emissão luminosa de um dado objeto que deveria se encontrar numa determinada "cor", se encontra deslocada do azul para o vermelho. Este efeito é chamado de "desvio para o vermelho". Não devemos confundir este "desvio para o vermelho gravitacional" com o "desvio para o vermelho" produzido pelo efeito Doppler, devido ao afastamento relativo entre a fonte e o observador.

4 EXPERIÊNCIAS

Para tentarmos estimular o aluno a buscar conhecimentos não só nos livros de 2º grau e sim no seu dia-a-dia, daremos a ele uma noção dos tamanhos dos planetas, tomando como referência o planeta Terra. Logo depois, daremos a noção da distância entre os planetas e o Sol, usando sempre materiais simples que são utilizados no cotidiano dos estudantes e professores.

4.1 Primeira Experiência

Materiais utilizados

- Uma bola de encher
- Espelho pequeno
- Papel branco
- Bolinhas de isopor
- Tinta guache
- Aspirador de pó
- Um barbante grande

Procedimento

Com o auxílio da *Tabela 1*, faremos um modelo do tamanho dos planetas e do Sol, tendo a Terra como referência. Sendo de 6400 Km o raio da Terra, temos uma escala de 17383730:1. O aluno conseguirá ter uma visão mais ampla do tamanho dos astros do sistema solar. Vemos na *Figura 22* uma representação dos tamanhos dos planetas com sua proporcionalidade.

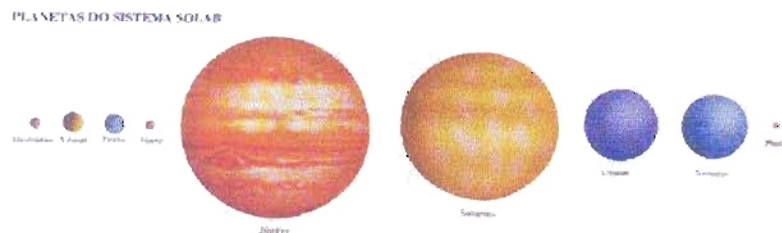


Figura 22. Ilustra a proporção do tamanho dos planetas [5].

- Sol: 40 cm
- Mercúrio: 1,4 mm
- Vênus: 3,5 mm
- Terra: 3,7 mm
- Marte: 1,9 mm
- Júpiter: 4,1 cm
- Saturno: 3,5 cm
- Urano: 1,5 cm
- Netuno: 1,4 cm
- Plutão: 0,7 mm

*usar
mesmo
representados*

- O planeta Mercúrio, que é pequeno em comparação à Terra, é feito com massa de modelar.
- O planeta Vênus tem praticamente o mesmo raio do planeta Terra e é feito com massa de modelar.
- O planeta Terra, que usamos como referência, é feito com massa de modelar.
- O planeta Marte tem quase a metade do raio do planeta Terra e é feito com massa de modelar
- O planeta Júpiter é um dos quatro gigantes gasosos e o seu volume é muito maior do que o volume da Terra. É representado por uma bola de isopor devidamente pintada, com raio aproximadamente 11 vezes maior que o raio da Terra.
- O planeta Saturno faz parte dos quatro grandes gasosos e tem 9 vezes o raio da Terra. É representado pela bola de isopor, com seu anel formado por uma estreita camada de asteróides.
- O planeta Urano também faz parte dos quatro grandes gasosos, e pode ser representado por massa de modelar ou uma bola de gude de cor

azul escuro. Urano tem 4 vezes o raio da Terra.

- O planeta Netuno tem praticamente o mesmo raio de Urano, e é outro que faz parte dos quatro grandes gasosos.
- O planeta Plutão é bem menor do que o planeta Terra, e tem praticamente o mesmo raio da Lua. Pode ser representado por uma pequena massa de modelar ou até mesmo por um grão de areia.
- O Sol tem o raio 109 vezes maior do que a Terra. A melhor maneira de representá-lo é utilizar um barbante de perímetro igual a 2,50m, encher uma bola de encher de festa com o auxílio de um aspirador, até o limite do perímetro do barbante.

Depois de termos a noção de quão grande é o Sol, em comparação com o nosso planeta, podemos demonstrar o princípio do funcionamento do ar condicionado ou da geladeira, ao esvaziar a bola de festa. Para tanto, basta colocar a mão e veremos que a bola estará ligeiramente fria: ao diminuir a pressão com certa rapidez, ocorre a diminuição da temperatura. Isso é só para demonstrar que uma experiência pode apresentar vários conceitos sobre a Física.

Para demonstrar as distâncias entre os planetas, podemos utilizar um barbante de aproximadamente 10 metros. Como referência, podemos dizer que a distância aproximada entre a cidade do Rio de Janeiro e São Paulo é de 400 km e a distância entre a Terra e a Lua é de $3,8 \times 10^5$ km. Podemos ir aproximadamente 9600 vezes do Rio a São Paulo com essa distância, e a distância entre o planeta Terra e o planeta Vênus - que é o mais próximo da Terra - é de aproximadamente 110 vezes a distância entre a Terra e a Lua. A seguir mostramos as distâncias dos planetas ao Sol com uma escala de aproximadamente $1:3,6 \times 10^{11}$.

- Sol: Ponto inicial
- Mercúrio: 10,5 cm
- Vênus: 18 cm
- Terra: 25 cm
- Marte: 36,5 cm

- Júpiter: 1,27 m
- Saturno: 2,35 m
- Urano: 4,77 m
- Netuno: 7,54 m
- Plutão: 9,99 m

4.2 Segunda Experiência

Nessa segunda experiência demonstraremos como calcular os tamanhos aproximados do diâmetro do Sol e da distância da Terra a Lua.

Sabendo-se o diâmetro da Lua em quilômetros, é fácil obter-se a sua distância. Para isso, é só determinar o ângulo compreendido pelo limbo lunar. Procure uma janela que esteja voltada, aproximadamente, ou para o nascente ou para o poente. Numa noite próxima à Lua cheia, cole duas tiras de esparadrapo ou fita isolante paralelas, separada por 30mm aproximadamente, no vidro da janela. A observação deverá ser feita pouco depois do "nascimento" da Lua, se a janela estiver voltada para o nascente, se a janela estiver voltada para o poente.

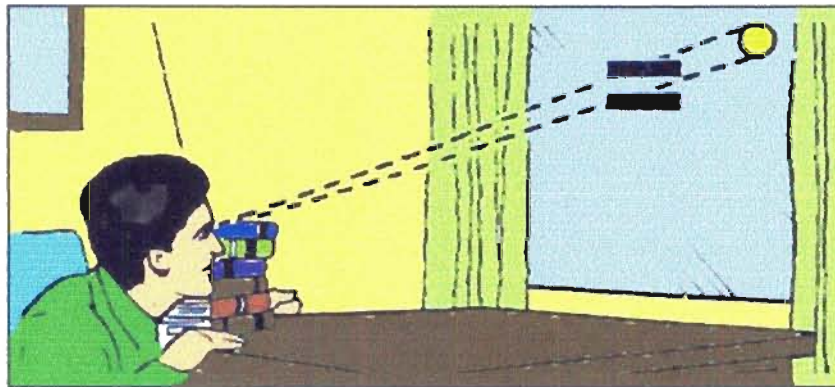


Figura 23 Determinação da distância entre a Terra e a Lua [12]

Agora, com apenas um olho aberto, procure ficar a uma distância tal que a Lua "toque" a parte interna das fitas. Feito isto, marque a posição em que seu olho se encontra com o auxílio da quina de livros empilhados até uma altura como vimos na Figura 23 conveniente. Meça a distância com a maior precisão possível dos livros até as fitas, assim como a separação da parte interna das

fitas.

À distância da Terra à Lua, em quilômetros, é obtida pela relação:

$$LF/LL = SF/DL$$

Onde: SF = separação entre as fitas, LF = distância entre os livros até as fitas,

DL = diâmetro da Lua que é igual à 3.740km e LL = distância da Lua

Qual será o diâmetro do Sol em quilômetros? A experiência é semelhante à anterior.

O nosso astro é muito brilhante e vamos tirar proveito disto para efetuarmos a experiência. Usaremos o princípio da "câmara escura".

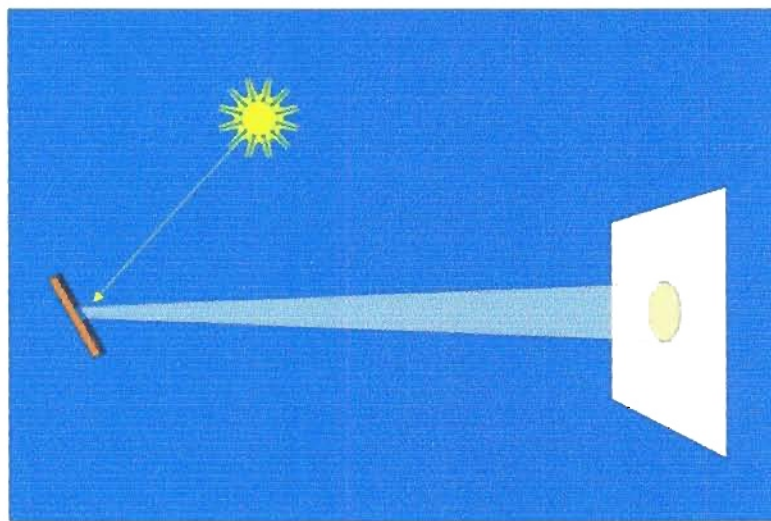


Figura 24 Determinação do diâmetro do Sol [12]

Use um pequeno espelho coberto por um papel preto em que foi previamente feito um furo de aproximadamente 4mm. Agora, projete a imagem refletida do Sol a uns 5 ou 7 metros de distância em um papel branco fixo em uma parede. Meça agora a distância precisa do espelho até a imagem, assim como o diâmetro da mesma. Será necessário apoiar o espelho em algum lugar para se obter uma imagem "imóvel", por pelo menos alguns segundos, para ser medida como mostra a Figura 24.

O diâmetro do Sol, em quilômetros, é obtida pela relação :

$$D/DS = L/LS$$

Onde D = diâmetro da imagem, DS = Diâmetro do Sol, L = distância da imagem ao furo e LS = distância do Sol à Terra.

Nesta atividade vamos representar a proporção dos tamanhos do Sol e dos planetas, além das distâncias dos planetas ao Sol. É interessante mostrar isso às crianças. Tente fazer num jardim ou numa praça essa representação.

4.3 Terceira Experiência

O objetivo da terceira experiência é demonstrar que a aceleração da queda dos corpos independe de suas massas, e que os corpos caem com a mesma velocidade ao mesmo tempo: o fator determinante da velocidade da queda dos corpos é a gravidade local e não a massa dos corpos, e que a resistência do ar exerce uma influência decisiva.

Usamos duas folhas de papel iguais, as jogamos simultaneamente e veremos que elas caem lentamente. Logo após amassamos uma das folhas em forma de uma bola e a outra deixamos sem amassar, realizando o mesmo procedimento anterior. A bola que está amassada cairá mais rápido que a outra.

Outra maneira simples de demonstrar tal fato é pegarmos um livro e um pedaço de isopor de mesmo tamanho: ao jogarmos os objetos simultaneamente, veremos que o livro cai mais rápido do que o isopor. Em seguida deixamos cair o livro e o pedaço de isopor, mas agora o isopor será abandonado em cima do livro. Como a queda do livro cria um vácuo entre este e o pedaço de isopor, o aluno verá o pedaço de isopor caindo com a mesma velocidade do livro – ou seja, nesta situação não temos a resistência do ar a retardar a queda do isopor.

Com isso abriremos uma discussão na qual explicaremos que a massa dos corpos não interfere no movimento de queda livre, e sim a resistência do ar é o fator determinante para a velocidade de cada um dos objetos.

5 CONCLUSÃO

Tanto no ensino da Gravitação universal, como na disciplina de Física, observa-se que o objetivo principal é fazer com que o aluno memorize alguns tópicos básicos para que alcance bons resultados em provas e vestibulares. Porém, quando há necessidade de raciocínio por parte do aluno, ele não é capaz de fazê-lo, uma vez que isto nunca foi exigido durante o ensino médio.

Por isso, é fundamental inserir o ensino com exemplos práticos para que o aluno tenha capacidade de análise crítica e relacione situações do cotidiano com o que foi ensinado em sala de aula.

Muitos professores sentem-se desmotivados por não acreditarem que as más condições das escolas brasileiras permitam que eles exemplifiquem situações através de experimentos, devido ao alto custo dos materiais. Constata-se, porém, que é possível levar para sala de aula experimentos simples e de baixo custo, que são fundamentais para um melhor entendimento do que foi ensinado.

Este trabalho procurou demonstrar que experiências simples podem auxiliar a compreensão de conceitos como a gravitação universal, assim como entender fenômenos como satélites em órbita, queda dos corpos e os tamanhos e massas dos astros, mecanismo do sistema solar, e muitos outros, tão presentes no nosso dia-a-dia – ou seja, através de experimentos de fácil acesso a todos; alunos e professores do ensino médio podem incrementar o aprendizado de diversas matérias da Física.

Sabe-se que o ensino da Física não é dado de maneira satisfatória, mas cabe aos professores reverter essa situação, pois se nada for feito, continuaremos o ensino de ciências de forma pouco objetiva e estimulante para alunos e professores.

Em sala de aula, mais importante que proporcionar um contato superficial com o ensino da física, é procurar romper os métodos de ensino tradicionais por meio do desenvolvimento e interação ativa dos alunos nos processos de construção do conhecimento da Física.

Conforme vimos na Tabela 2 da Introdução, os alunos possuem uma grande deficiência nas leis de Kepler e a gravitação universal. Cabe aos professores reverter esse quadro para que tenhamos melhores resultados no ensino da física.

Prova?



da
evidência

[boa
muito
propõe]

?

REFERÊNCIAS

- [1] Antunes, C.; *Geografia e Participação 1*, Editora Scipione, 1998.
- [2] Ramalho, Nicolau, Toledo. *Os Fundamentos da Física*, Editora Moderna, 1995.
- [3] Calçada, C., Jose Sampaio, *Física Clássica*, Atual Editora, 1991.
- [4] Bonjorno, C., *Temas de Física*, Editora FTD, 1998.
- [5] O Globo, Enciclopédia, *O Universo*, 1999.
- [6] Gleiser, M. *A Dança do Universo*, Companhia das letras, 1997.
- [7] Speyer, E., *Seis Caminhos a Partir de Newton*, Editora Campus, Tradutor: Ivo Korytowski, Consultor editorial e revisor técnico: Adir M. Luiz, 1995.
- [8] Hawking, S., *O Universo Numa Casca de Noz*. Editora Edarx, 3º edição Tradução: Ivo Korytowski, Revisão técnica: Augusto Damineli, 2002.
- [9] <http://www.fisicaigor.hpg.com.br>, 2002.
- [10] http://intermega.Globo.com/gravitacao_universal/gravitacao.htm, 2002.
- [11] Young, H. D.; Freedman, R.A.; *Física II*; Editora Addison Wesley; Tradutor: Luiz, A. M., 2003.
- [12] <http://www.feiradeciencias.com.br/sala23>