

Instituto de Física
UFRJ



MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

**ECLIPSES E OS MOVIMENTOS DOS ASTROS:
UMA ABORDAGEM HISTÓRICA.**

Aluno: Adriano Jorge Figueira

Orientadora: Wilma Machado Soares Santos

22/2007

Outubro / 2007



AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido ao longo de dois semestres não consecutivos e se não fosse por algumas pessoas, por quais tenho muita estimaçãõ, ele provavelmente não chegaria a esta forma de monografia de final de curso. Apesar de muitas dificuldades terem aparecido ao longo de todo este tempo, principalmente no último semestre, essas pessoas de quem falo não me deixaram desistir e, sempre que possível, me apoiaram e, muitas vezes desprenderam parte de seu precioso tempo para me auxiliarem. Devo muito a eles, não apenas pelo apoio no trabalho propriamente dito, mas antes de tudo, pelo fato de, em sua maioria serem meus amigos pessoais. Boa parte de meus colegas da UFRJ e UERJ, assim como alguns da UFF me deixaram entusiasmado com seu interesse pelo assunto aqui tratado e tornaram-se, assim, uma grande fonte de inspiração. É uma pena não poder citar cada um deles. Mas, com certeza, esses amigos sabem de meu grande respeito, admiração e gratidão para com eles.

Agradeço muito à minha grande amiga Isis Albuquerque de Souza Maranhão – formanda em Matemática pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro - por me deixar fazer parte do trabalho em seu computador, quando o meu estava com problemas; por me disponibilizar sua biblioteca pessoal; discutir comigo acerca da parte experimental do trabalho; por imprimir cópias preliminares do trabalho e, acima de tudo, por todo apoio e incentivo ao longo destes 10 anos de amizade.

Jamais poderia esquecer de agradecer ao professor Dr. Luiz Felipe de Souza Coelho – professor do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro – que, além de ter grande influência na escolha deste tema, por muitas vezes, me atendeu em sua sala, deixando que usasse seu computador; discutindo, comigo, grande parte do conteúdo histórico desta monografia e me ajudando com a bibliografia referente à história da ciência.

Deixando por último, porém em especial, minha orientadora de monografia, professora Dr^a. Wilma Machado Soares Santos – professora do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro – por sua orientação, incentivo, compreensão, paciência e “puxões de orelha” quando necessário.

“Educai as crianças, para que não
seja necessário punir os adultos”.

Pitágoras
(570- 490 a.C.).

RESUMO

Baseando-se na Teoria da Aprendizagem Significativa, desenvolvida por David Ausubel, as aulas sobre o assunto são preparadas fazendo-se uso de toda uma sistemática voltada à identificação de conhecimentos prévios relevantes (“subsumers” ou conceitos âncora) e, após esta identificação, faz-se da História uma ponte entre o que o aluno sabe e se pretende ensinar. A articulação histórica dos conceitos facilita a quebra com a aprendizagem mecânica. Além dos experimentos e sugestões de planos de aula, este trabalho culmina com parte da história do desenvolvimento dos conceitos relacionados à Gravitação; os conceitos e os grandes pensadores aparecem em ordem cronológica, cobrindo uma faixa de 2600 anos (desde 600 a.C). O material é justificado pelo intuito de possibilitar ao professor selecionar os trechos e linhas de raciocínio a seguir com sua turma, abrindo o leque de possibilidades de abordagens históricas, de acordo com cada tópico do assunto.

SUMÁRIO

1. <u>INTRODUÇÃO</u>	5
2. <u>METODOLOGIA</u>	6
2.1 Levantamento de subsunçores (ou conceitos-âncora)	10
2.2 Mapa Conceitual	12
3. <u>CONSIDERAÇÕES HISTÓRICAS</u>	13
3.1 Preliminares	13
3.2 Importância histórico – científica dos eclipses	33
4 <u>TEORIA DOS ECLIPSES</u>	35
4.1 Eclipses do Sol	37
4.2 Eclipses da Lua	39
4.3 Uma estimativa grosseira	41
4.4 Eclipses recentes	42
5 <u>MODELO EXPERIMENTAL</u>	44
6 <u>PLANO DE AULAS</u>	49
6.1 Aula 1	49
6.2 Aula 2	52
6.3 Aula 3	55
7 <u>QUESTIONÁRIO DIDÁTICO</u>	58
7.1 Perguntas	58
7.2 Respostas	59
8 <u>CONCLUSÃO</u>	61
9 <u>BIBLIOGRAFIA</u>	62

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é propor, baseado na Teoria da Aprendizagem significativa (de David Ausubel) [1, 2, 3], uma metodologia para o ensino, no Nível Médio de Educação, de conceitos relacionados aos eclipses e movimentos dos astros. Para tanto, este trabalho é dividido em seis partes: metodologia, considerações históricas, teoria dos eclipses, modelo experimental, plano de aulas e questionário didático. Ao final, apresentamos as conclusões e a bibliografia.

Na primeira parte, metodologia, é feito o levantamento de conceitos-âncora (subsunçores) e constrói-se o mapa conceitual relacionado aos conceitos que serão abordados durante as aulas. Nas considerações históricas é feita uma abordagem histórica dos conteúdos e conceitos. Entre as questões levantadas e discutidas nesta parte do trabalho, temos: Como surgiram as primeiras idéias acerca do assunto? Quem teve estas idéias? Como estas idéias influenciaram / influenciam o pensamento humano atualmente? Quais foram suas conseqüências no desenvolvimento da história?

Na terceira são discutidos aspectos gerais relacionados aos eclipses, tais como: sua formação, sua duração e sua periodicidade de ocorrência. Na quarta parte do trabalho, modelo experimental, é apresentado um aparelho usado para ajudar a visualização dos movimentos do sistema Sol-Terra-Lua. Além de sua apresentação, também é feita uma descrição dos procedimentos para a sua construção e utilização. Na quinta parte apresentamos o plano de aulas. O conteúdo a ser discutido é dividido em três aulas, de cinquenta minutos cada, com o cronograma de cada uma sendo aqui apresentado. Na sexta é apresentado o questionário didático. A função deste questionário é ajudar a direcionar o tipo de questões que podem ser levantadas pelo professor e, por que não, pelos alunos, auxiliando na revisão e fixação do assunto. As questões foram elaboradas de tal forma que, enquanto algumas podem começar a ser trabalhadas antes do término das aulas, outras exigem o conhecimento de detalhes sutis, como as questões relacionadas ao efeito maré.

Ao longo do trabalho enfatizamos continuamente a interligação entre as diversas áreas do conhecimento, nos adequando, assim, às recomendações dos PCN's [4]. Todo o desenvolvimento do trabalho foi baseado, também, nas respostas dos alunos ao questionário inicial. Este não pôde ser aplicado posteriormente e, por isto, o trabalho trata-se de uma proposta apenas.

2. METODOLOGIA

Na década de sessenta, David Ausubel propôs a sua *Teoria da aprendizagem significativa*, onde enfatiza a aprendizagem de significados (conceitos) como aquela mais relevante para os seres humanos. Ele ressalta ainda, que *a aprendizagem significativa é um processo de interação entre elementos presentes na estrutura cognitiva prévia do aluno e o material ou conteúdo de aprendizagem* [1]. Essa interação vem acompanhada de constantes modificações tanto na estrutura cognitiva do aprendiz quanto na maneira através da qual este vê o material a ser aprendido. É este caráter dinâmico que constitui a essência da aprendizagem significativa.

Para ser verificada a aprendizagem significativa é essencial que haja três requisitos fundamentais. Os dois primeiros são: a oferta de um novo conhecimento estruturado de maneira lógica e a existência, na estrutura cognitiva do aprendiz, de conhecimentos que possibilitem a sua conexão com o novo conhecimento. Estes conhecimentos são chamados de **conceitos incluídos (ou “subsunoços”, segundo a maioria dos autores)** (do inglês “subsumer”- incluídos) ou **conceitos âncora**. O terceiro requisito é, enfim, a atitude explícita de apreender e relacionar o seu conhecimento prévio com aquele que pretende absorver. Segundo Ausubel:

“Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria o seguinte: o fator isolado mais importante influenciando a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Determine isso e ensine-o de acordo”. [1]

A denominação “âncora” deve-se ao fato de que, segundo Ausubel, os novos conhecimentos são aprendidos significativamente quando aqueles, relevantes e já adequadamente claros na estrutura cognitiva do aluno, dão o suporte necessário para o aprendizado destes conteúdos novos.

Uma das grandes contribuições de Ausubel é marcar claramente a distinção entre aprendizagem significativa e a **aprendizagem mecânica**.

A aprendizagem mecânica ou memorística se dá com a absorção literal e não substantiva do novo material. Por exigir um esforço muito menor do que aquele necessário para a aprendizagem significativa, esse método é muito utilizado quando os alunos se preparam para exames escolares. Principalmente aqueles exames que exigem respostas literais às suas

perguntas e que não exigem do aluno uma articulação entre os tópicos do conteúdo em questão.

Ausubel sugere o uso da aprendizagem mecânica em casos extremos, quando não se consegue perceber a presença de conhecimentos âncora (subsunçores) na estrutura cognitiva do aluno. Propõe assim, que o conhecimento inicial seja memorizado e, a partir desse conhecimento absorvido, seja estruturado o conhecimento acerca do tópico considerado. Ele, no entanto, criou uma nova alternativa para essa situação, ao sugerir a utilização de **organizadores prévios**. Estes são pontes cognitivas entre o que o aprendiz já sabe e o que precisa saber. Eles são construídos com elevado grau de abstração, generalidade e inclusividade, de modo a poder se apoiar nos pilares fundamentais da estrutura cognitiva do aprendiz e, desse modo, facilitar a apreensão de conhecimentos mais específicos com os quais ele está se deparando.

Ausubel indica que a maneira mais natural de aquisição de conhecimentos é através de **diferenciação progressiva**. É mais fácil construir o conhecimento, quando se inicia de uma idéia mais geral e inclusiva e se caminha para idéias menos inclusivas. Isto é, estruturando e seqüenciado o ensino a partir de **hierarquias conceituais**. Por exemplo, seria como fazer um estudo sobre uma forma específica de energia começando por caracterizar a energia de modo geral, nas suas diversas formas. No passo seguinte, seria estudada a energia de acordo com a forma em que ela se apresenta: energia térmica; energia elétrica; energia mecânica.

A identificação dos elementos mais gerais e inclusivos de um determinado conteúdo e a organização destes pontos em uma seqüência hierárquica, cuja representação simbólica denomina-se **mapa conceitual**, pode tornar-se extremamente difícil e complexa, além de exigir domínio profundo do assunto. Gowin, um dos autores que estudou as idéias de Ausubel e as aprofundou, propõe uma seqüência de cinco perguntas, de caráter diretivo, para ajudar nessa tarefa, como referido em [5], a saber: *“quais são as perguntas-chave a que responde a disciplina em questão? Quais são os conceitos-chave? Quais são os métodos de pesquisa utilizados para gerar o seu conhecimento? Quais afirmações principais formulam na resposta às perguntas-chave? E, finalmente, que juízos de valor intervêm?”*.

“Vale a pena destacar que este tipo de seqüência se baseia essencialmente no que podemos denominar estrutura psicológica do conteúdo, mas que não ocorre na sua estrutura lógica. Em outros termos e a partir dessa formulação, é importante diferenciar a organização formal do conhecimento de uma matéria, no estado final de elaboração e como um produto - a estrutura lógica do conteúdo - e representação organizada e interna desse conhecimento nas pessoas - a estrutura psicológica -; e postulamos que a segunda é a que tem maior relevância

como um guia para sequenciar e organizar o ensino. Nesse ponto, as idéias de Ausubel coincidem com as de outros autores de inspiração cognitiva que se preocuparam em sequenciar e organizar os conteúdos de ensino”.

Um modo de se identificar conhecimentos prévios relevantes é a avaliação das respostas dos alunos a um questionário. W.M.S.S, P.M.C.D e M.T.S.S, em [6] propõem uma sistemática deste tipo de avaliação, como segue:

“1. Um questionário é aplicado em sala de aula, antes que um tema específico de Física seja lecionado. As respostas dadas pelos aprendizes indicariam conceitos subsunçores e como estão sendo utilizados, mesmo se misturados a crenças ou ficção. Para inspirar a elaboração do questionário, procura-se satisfazer a duas condições:

- a) As questões devem tentar seguir os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's) [4], que recomendam que o ensino médio deva contemplar a interdisciplinaridade e o cotidiano do aprendiz.*
- b) As questões devem ser baseadas em questões de livros didáticos consagrados, usados no ensino médio, como o de Beatriz Alvarenga e Antonio Máximo e o de Alberto Gaspar.*

2. Busca-se, na História da Física, o “como” e o “porquê” um dado tema e seus conceitos pertinentes foram propostos: Esse tipo de História da Física mostra o que é preciso saber para fundamentar um tema e seus conceitos. A ênfase em problemas, no modo como foram colocados e como vieram a ser solucionados é o diferencial que torna a História adequada como organizador prévio potencial.

Um texto de História é preparado, no qual conceitos subsunçores dos aprendizes dão seqüência à formação do conceito correto.

3. Uma aula com base no texto é ministrada, antes que a aula teórica de Física, nos moldes tradicionais, seja ministrada.”

Neste trabalho apresentamos um material instrucional, para alunos do ensino médio, norteado dentro dos moldes discutidos até o presente momento. Não perdendo o momento

oportuno, reitero um caráter singular neste texto: Aqui, com base nos trabalhos de W.M.S.S e P.M.C.D [6], a **História** é proposta como um *Organizador Prévio*. O método de verificação de conhecimentos prévios relevantes, “subsunçores”, foi aplicado a uma turma de vinte e quatro alunos do curso pré-vestibular da fundação CECIERJ (Estadual), num dos pólos da baixada fluminense. Como o material não foi testado depois da aplicação do questionário prévio, não podemos afirmar se a História funciona, realmente, como organizador prévio. Os resultados obtidos se encontram a seguir.

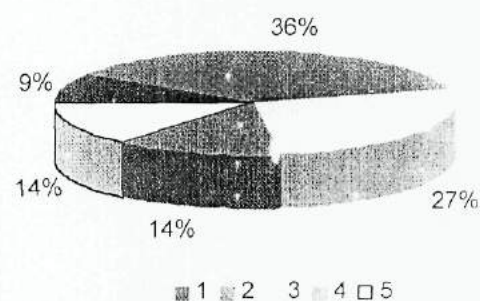
2.1: Levantamento de conceitos-âncora (ou subsunçores)

Foi aplicado, numa turma de 24 alunos, um questionário contendo 5 perguntas e os resultados obtidos foram os que seguem. Os itens em destaque correspondem aos possíveis subsunçores.

1º questão: *O que você entende por eclipses?*

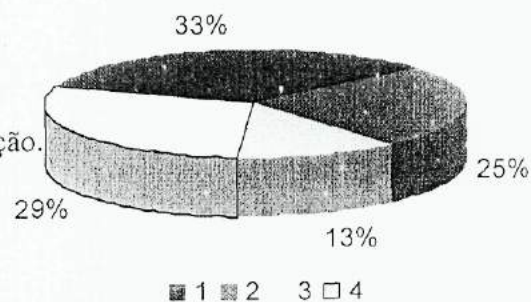
LINHAS DE RESPOSTA:

- 1- Projeção de sombras.
- 2- Alinhamento dos Planetas.
- 3- É um fenômeno natural.
- 4- Fica tudo escuro.
- 5- N.S.R.



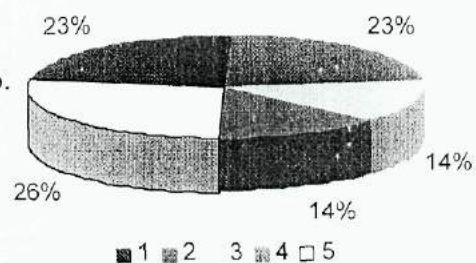
2º Questão: *Você saberia responder como os eclipses ocorrem?*

- 1- Sol, Terra e Lua se alinham ou ficam na mesma direção.
- 2- Um astro faz uma projeção ou sombra sobre outro.
- 3- Sol, Terra e Lua se encontram ou ficam na mesma posição.
- 4- N.S.R.



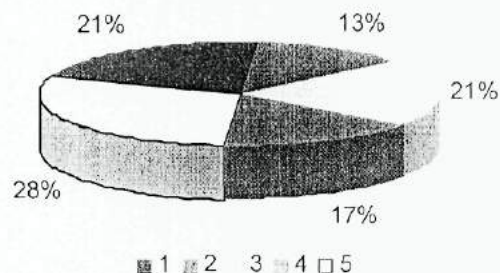
3º Questão: *Você saberia explicar por que os eclipses acontecem?*

- 1- Alinhamento dos Planetas.
- 2- Sol, Terra e Lua se encontram ou ficam na mesma posição.
- 3- Algo relacionado com rotação e translação.
- 4- Outras respostas.
- 5- N.S.R.



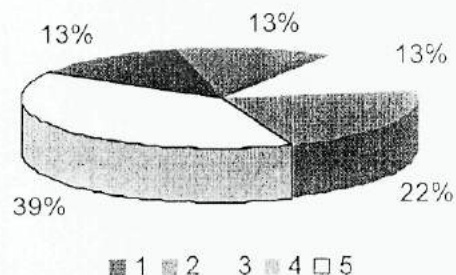
4º Questão: *Existe diferença entre eclipse Solar e eclipse Lunar? Se sim, explique.*

- 1- Um ocorre de dia e o outro ocorre à noite.
- 2- No Solar, o Sol fica na frente da Lua.
- 3- Acertaram ou, apenas inverteram as posições.
- 4- Responderam, apenas, sim.
- 5- N.S.R.



5º Questão: *Comente, ao seu modo, a expressão “A Lua está em constante queda para a Terra”.*

- 1- A Lua é atraída pela Terra e vice – versa.
- 2- Efeitos Gravitacionais.
- 3- A Lua está se aproximando da Terra.
- 4- Outras respostas.
- 5- N.S.R.

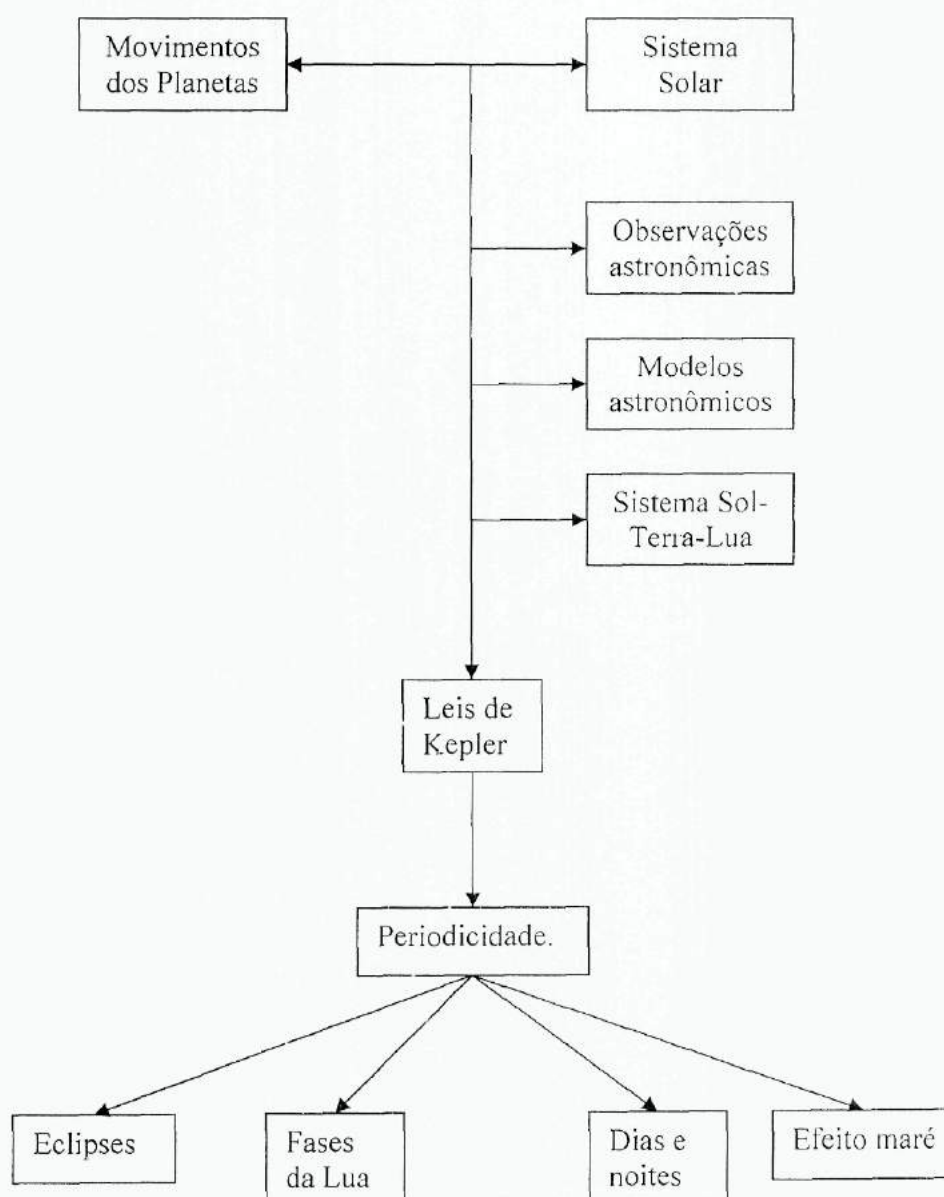


A partir destas respostas e da identificação dos possíveis “subsunçores”, foi elaborado um mapa conceitual, o plano de aulas e o questionário didático (capítulos seis e sete deste trabalho, respectivamente). O mapa conceitual é apresentado no próximo item.

2.2: Mapa Conceitual

Os mapas conceituais são representações hierárquicas das relações entre conceitos relativos a uma área de domínio particular. Eles podem ser usados, por exemplo, para explorar os conhecimentos prévios dos alunos; extrair o significado de um trabalho de campo ou material escrito ou, como neste caso, representar uma rota ou trajetória de ensino e aprendizagem.

Gravitação Universal



3 CONSIDERAÇÕES HISTÓRICAS

3.1: Preliminares

Há dois aspectos nas observações astronômicas que complicam consideravelmente sua interpretação. Um deles é o fato de os corpos celestes observados se encontrarem muito distantes da Terra, de modo que usualmente só os vemos como pontinhos luminosos, e quando falamos de sua “posição” referimo-nos em geral à direção em que são observados, sem que possamos estimar a sua distância a olho nu. Sendo assim, é natural projetar essas direções sobre a chamada “abóbada celeste” (uma esfera de raio muito grande; “muito grande” no sentido de ser grande o suficiente para que a esfera contenha a Terra, porém não tão grande que não possamos ver a luz vinda dos astros localizados sobre a abóbada), como se se tratasse de pontos sobre a superfície dessa esfera. Um esquema simplificado desta “esfera celeste” é ilustrado na figura 1 [7]

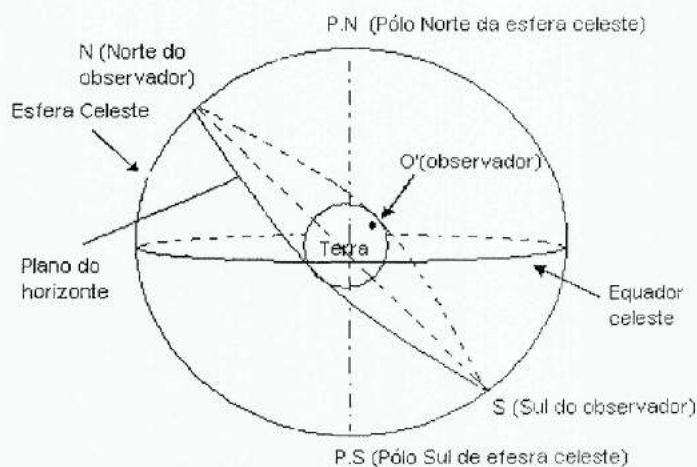


Figura 1: Esfera Celeste [7]

A outra complicação é devida ao movimento de **rotação** da Terra em torno do seu eixo. Assim, somos observadores sobre uma espécie de plataforma girante, como um carrossel (um referencial não inercial!). E os movimentos aparentes dos corpos celestes, vistos da Terra, são o resultado destas complicações.

Há cinco planetas visíveis a olho nu, conhecidos desde a mais remota antiguidade: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. A palavra “**planeta**” em grego significa errante, viajante.

Os gregos da Antiguidade denominaram estes corpos celestes de planetas porque os observavam “viajando” entre as estrelas “fixas”.

Ao observarmos o céu vemos que o movimento dos planetas se faz, geralmente, de oeste para leste (não confundir com o movimento diurno do Sol, que se faz de leste para oeste), mas em certas épocas do ano, dependendo de cada planeta (para mercúrio, três vezes por ano), este movimento muda, passando a ser de leste para oeste, descrevendo uma espécie de laço. Este movimento retrógrado pode durar vários meses (dependendo do planeta) e vai ficando cada vez mais lento até que troca de sentido novamente, retomando seu curso normal. O movimento observado de cada planeta é uma combinação do movimento do planeta em torno do Sol com o movimento da Terra em torno do Sol, e é fácil de explicar quando sabemos que a Terra está em movimento, mas fica demasiadamente difícil de descrever em um sistema em que a Terra esteja parada. Apesar da dificuldade em se compreender e explicar os movimentos observados dos planetas em um **sistema Geocêntrico** (A Terra no centro do universo), o geocentrismo foi a idéia dominante na astronomia durante toda a antiguidade e idade média.

3.1.1 Os primeiros grandes pensadores e as esferas celestes

Foi na Grécia antiga que surgiu o conceito de cosmo e o método científico de sua investigação, da maneira como é interpretada atualmente. Seis séculos antes de Cristo, **Tales de Mileto** já estava convencido da curvatura da Terra, sabia que a Lua era iluminada pelo Sol e previu o eclipse solar do ano 584 a.C!. **Pitágoras** (séc. VI a. C) e sua escola já falavam da esfericidade da Terra, Lua e Sol, da rotação da Terra e da revolução de, pelo menos, dois planetas interiores, Mercúrio e Vênus, em torno do Sol. No princípio do século IV a.C, **Platão** propôs a seus discípulos um problema que teve grande influência no desenvolvimento posterior das teorias sobre o sistema solar [8]:

“Quais são os movimentos uniformes e ordenados cuja existência é preciso supor para explicar os movimentos aparentes dos planetas?”

Platão tinha a idéia de que o universo deveria ser explicável a partir de coisas perfeitas e harmoniosas, como círculos, esferas e movimentos uniformes.

Enquanto se tratava de resolver o problema do movimento aparente diurno das estrelas, bastava imaginar uma “esfera terrestre” fixa e uma “esfera celeste” concêntrica, girando uniformemente em torno da primeira. No entanto, para explicar o movimento aparente diurno e anual, por exemplo, do Sol, este método era falho. **Eudoxo**, discípulo de Platão, imaginou um sistema complicado onde, ao invés de duas esferas, haveria diversas “esferas celestes” homocêntricas, presas umas às outras de tal forma que fosse possível girarem em torno de eixos diferentes, como um giroscópio (Figura 2). Assim, para o Sol, a esfera externa representaria o movimento de rotação diurno; a interna, ao qual o Sol estaria preso, giraria junto com a externa, porém, com seu eixo inclinado em relação ao dela, mas ao mesmo tempo giraria em torno do Sol, correspondendo à rotação anual (**eclíptica**). Para cada planeta haveria três ou quatro esferas, com eixos de rotação diferentes e com velocidades diferentes. Isso permitia reproduzir, inclusive, os movimentos retrógrados. A figura 2, a seguir, ilustra o giroscópio mencionado:

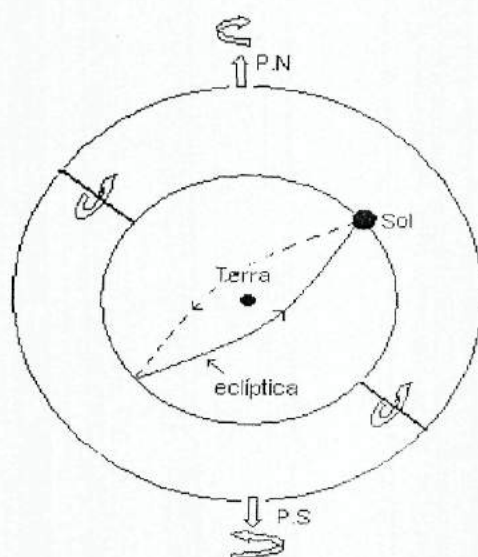


Figura 2: Simplificação do esquema imaginado por Eudoxo [7]

Ao que tudo indica, Eudoxo não imaginava suas esferas objetos físicos reais, mas sim, artefatos matemáticos. No entanto, **Aristóteles** (séc. IV a. C) as interpretou como objetos materiais (“esferas cristalinas!”). Assim, chegou a um gigantesco mecanismo, formado por cinquenta e cinco esferas, todas movidas pela mais externa (“o motor primário”).

3.1.2 A contradição no modelo das esferas celestes e uma nova proposta

Após a dissolução dos estados gregos, a ciência encontrou novo lar em Alexandria, onde a investigação quantitativa do céu, baseadas em medidas sistemáticas, produziu rápidos avanços. Ao invés de se limitarem aos resultados numéricos, é notável como os grandes astrônomos gregos ensaiavam a aplicação das leis da geometria ao cosmo. **Aristarco de Samos**, que viveu na primeira metade do século III a.C, tentou comparar quantitativamente as distâncias Sol-Terra e Lua-Terra, assim como o diâmetro destes três corpos celestes. Como resultado dessas pesquisas, Aristarco foi o primeiro a propor que o Sol estaria no centro do universo (**sistema Heliocêntrico**) enquanto a Terra giraria em torno de um eixo e em volta do Sol. Além de dar uma explicação razoável sobre as fases da Lua, avaliou que as distâncias entre as estrelas fixas era “infinitamente” superiores à distância do Sol a Terra. Por adotar e ensinar o heliocentrismo, ele foi acusado de “perturbar o sono dos deuses”. As idéias de Aristarco estavam muito além de seu tempo!

Logo após as descobertas de Aristarco, o filósofo grego **Eratóstenes de Cirene** (276-196 a. C), além de ter sido o inventor do famoso “crivo de Eratóstenes”, um algoritmo simples para determinar os números primos, foi um dos primeiros a determinar o raio da Terra, com uma precisão notável para a época. Num solstício de verão (dia em que o Sol brilha exatamente na vertical), em Assuã (Siena, no Egito), o Sol iluminava um poço sem deixar sombras. Medindo o comprimento S da sombra de um objeto vertical em Alexandria, e relacionando-o com o comprimento L do próprio objeto através de $\text{tg}\alpha = S/L$, Eratóstenes determinou a distância angular entre Assuã e Alexandria (achando $7,5^\circ$); enviando depois um bem-tatista- andarilho treinado para calcular distâncias- à Assuã, ele mediu o arco de círculo D que liga Assuã à Alexandria, determinando assim o raio da Terra através da relação $R_t = D/\alpha$, encontrando 7300Km, próximo do valor conhecido hoje, de 6400Km. O método é puramente geométrico, mas já contém germes da ciência moderna, pois que as grandezas envolvidas no cálculo foram todas determinadas experimentalmente. Aos 80 anos de idade, deixou-se morrer de fome [9].

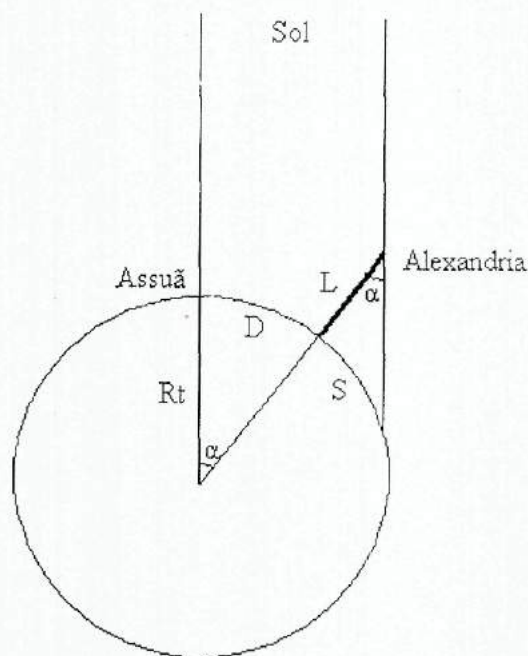


Figura 3: Método de Eratóstenes para determinação do raio da Terra [10]

O modelo das esferas celestes continha uma contradição grave, em relação à experiência: o brilho aparente dos planetas varia no decurso de suas órbitas, principalmente durante o movimento retrógrado (o tamanho aparente do planeta aumenta). Este fato sugere que eles se aproximam e se afastam da Terra. Tal fato seria incompatível com um modelo onde os planetas estariam se deslocando sobre uma esfera geocêntrica (à distância fixa da Terra). Os próprios astrônomos gregos propuseram um outro modelo, que não sofria desse defeito. Originalmente, o modelo foi sugerido pelo, assim considerado, primeiro grande astrônomo grego da antiguidade, **Hiparco de Rodas** e depois, elaborado por **Cláudio Ptolomeu de Alexandria** (90-168 d.C). O modelo permaneceu fiel ao programa platônico, empregando somente figuras “perfeitas” - círculos-e movimentos uniformes. A idéia básica do geocentrismo de Ptolomeu é de que a órbita do planeta em torno da Terra seja resultante de dois movimentos circulares acoplados. Segundo este modelo, o planeta tem um movimento circular uniforme sobre um círculo (“epiciclo”) cujo centro **C** descreve, também, um movimento circular uniforme, em torno de outro círculo (“deferente”) com centro na Terra [7].

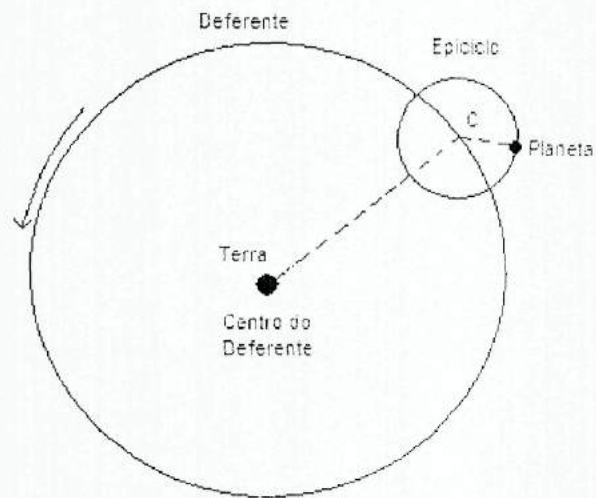


Figura 4: Modelo Ptolomáico [11]

Pode-se ver claramente que, neste modelo, o movimento retrógrado ocorre na porção do epiciclo interna ao deferente, ou seja, quando o planeta está mais próximo da Terra (pois nessa porção, a composição da velocidade do planeta com a velocidade do centro do epiciclo resulta numa velocidade de sentido oposto ao “movimento natural” do planeta). Devendo, então, seu brilho ser maior durante o movimento retrógrado, devido ao aumento do tamanho aparente. Isto é exatamente o fenômeno observado. Devido a isso, o modelo ptolomáico constituiu-se em um sucesso.

3.1.3 O “Maior dos Livros”

Havia ainda, alguns problemas não resolvidos. Ptolomeu teve que introduzir algumas modificações nesse esquema para dar conta de anomalias adicionais: a velocidade angular do centro do epí ciclo em torno da Terra sofre pequenas variações, e o movimento retrógrado não tem sempre o mesmo aspecto e duração. Para dar conta do movimento não uniforme dos planetas, Ptolomeu deslocou a Terra do centro do deferente e introduziu, ainda, o **equante**, que é um ponto ao lado do centro do deferente oposto à posição da Terra, em relação ao qual o centro do epí ciclo se move a uma taxa uniforme.

O objetivo de Ptolomeu era produzir um modelo que permitisse prever a posição dos planetas de forma correta e, nesse ponto ele foi bem sucedido. Suas adaptações permitiam prever as posições dos planetas com uma precisão de aproximadamente 2º (notável para a época). Pela sua grandeza intelectual, o *Almagesto* (“o maior dos livros”), como ficou conhecida a obra de Ptolomeu, mostra claramente a influência da filosofia de Aristóteles, e seu esquema de idéias tornou-se o dogma de uma doutrina rígida, o que contribuiu para a surpreendente durabilidade do sistema ptolomaico. Este ficou sem sofrer modificações substanciais por cerca de treze séculos! [7]

Após o declínio da academia de Alexandria, no início do século V, os cristãos, na Síria, e depois os árabes** (no século VII), em Bagdá, levaram adiante e desenvolveram o trabalho de Ptolomeu. Através da Espanha islâmica e de Bizâncio os textos gregos chegaram à Europa católica nos séculos XII e XIII, num surgimento associado ao renascimento da ciência nessas regiões. A tradução, os comentários e os dados que se foram anexando ao *Almagesto* formaram as fontes essenciais para um dos grandes livros da Europa ocidental, o *Tractatus de sphaera* (Tratado da esfera), de **Johannes de Sacrabosco**, forma latinizada de *John Holywood* (1200-1256), astrônomo inglês que ensinou na Universidade de Paris até sua morte. Sua obra foi reeditada, ampliada e comentada várias vezes.

** No séc.VII, inicia-se a expansão árabe pelo Oriente Médio, norte da África e Península Ibérica. Fundam a cidade de Bagdad; onde instalam a “casa da sabedoria”. Traduzem os manuscritos gregos para árabe e é com base, principalmente, nessas traduções que os conhecimentos da antiguidade voltaram para a Europa, traduzidos para o latim pelos conquistadores Europeus do século XII.

3.1.4 Um novo “impulso” às ciências

Após a grande crise do século XIV na Europa (a Peste e a Guerra dos Cem Anos), novo espírito científico e novas idéias aparecem no século XV, primeiro na Itália e, posteriormente, mais ao norte da Europa (Renascimento e Reforma). É um período de grandes inovações em muitos campos. As grandes expedições marítimas demandam instrumentos de navegação mais precisos e mostravam que havia erros na geografia de Ptolomeu - por que não no resto de sua obra? Erros acumulados durante séculos exigiam uma reforma no calendário, tornando necessários melhores conhecimentos de astronomia.

Em 1492 Colombo descobre a América e, poucos anos mais tarde, o astrônomo polonês **Nicolau Copernico** (1473-1543) apresenta, em estudos na Itália, o **sistema Heliocêntrico**. A base intelectual deste novo pensamento veio, em boa parte, do fato de escolas bizantinas terem preservado muitos trabalhos da Antiguidade. Com o declínio bizantino produzido pela quarta cruzada, em 1204, que destruiu o império, seguido pelo colonialismo de Veneza e Genova e terminado pela conquista turca em 1453, parte desses estudos chegou à Europa católica. Ao que tudo indica, informações fragmentadas sobre o sistema heliocêntrico dos antigos astrônomos, principalmente as anotações de **Aristarco de Samos**, tiveram grande influência sobre Copérnico.

Já se percebia que a maior distorção da lógica foi o conceito que cresceu na Europa ao longo dos anos...Afirmando que [12] “O Homem era a coisa mais importante do universo e que Deus o criou para ele! Logo, todo o universo, o Sol e as estrelas giravam em torno da Terra... Portanto, do próprio Homem!” Nota-se, nesta época, uma tendência para refutar a doutrina rígida aristotélica, substituindo-a por um processo de pensamento mais amplo e menos dogmático, como o dos seguidores de Pitágoras e Platão.

Por volta de 1510, Copérnico enviou, para alguns astrônomos de nomeada reputação, uma carta. Esta carta seria o resumo das idéias contidas em sua obra prima *De Revolutionibus Orbium Coelestium Libri VI* (Seis livros sobre as revoluções dos corpos celestes). A História conta que recebeu a primeira cópia do livro no dia de sua morte. O grande tratado de Copérnico, como o próprio título indica, era conceitualmente bastante próximo da astronomia grega heliocêntrica.. Procurou demonstrar que a principal vantagem do ponto de vista heliocêntrico seria a de simplificar a descrição, explicando as mesmas observações anteriores através de movimentos ainda mais próximos do ideal platônico, sem precisar usar artifícios como o dos equantes de Ptolomeu.

A passagem do geocentrismo para o heliocentrismo esta ilustrada na ilustração 1, a seguir; para a órbita de Vênus, que é um dos planetas internos, ou seja, situado entre a Terra e o Sol. Vemos que neste caso o deferente é substituído pela órbita da Terra em torno do Sol, e o epiciclo pela órbita de Vênus ao redor do Sol. É fácil verificar que, para um planeta externo, como Júpiter, os papéis do epiciclo e do deferente são trocados. Durante toda a vida Copérnico manteve a idéia da perfeição do movimento circular, sem supor a existência de outra forma de movimento entre os corpos celestes.

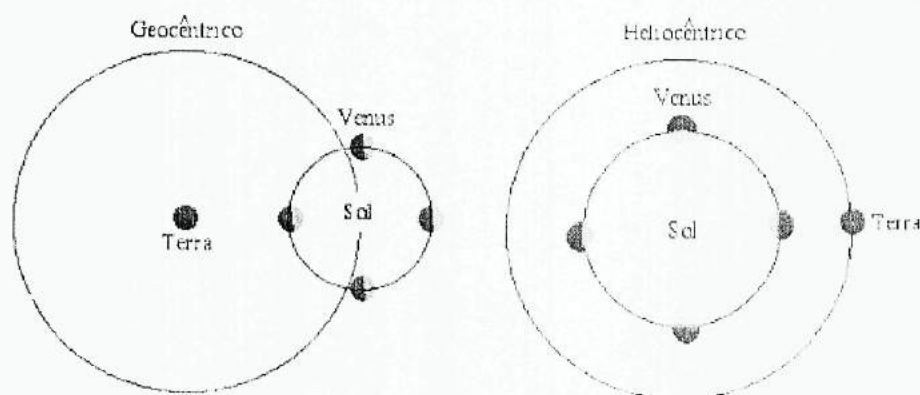


Ilustração 1: Do Geocentrismo ao Heliocentrismo [13]

Outra grande vantagem do sistema heliocêntrico é que ele permitiu a Copérnico deduzir pela primeira vez a escala relativa das distâncias dentro do sistema solar. No sistema geocêntrico a escala de distâncias era arbitrária: só importava a razão entre os raios do epiciclo e do deferente. As realizações mais importantes de Copérnico foram:

- Introduziu o conceito de que a Terra é apenas um dos seis planetas (então conhecidos) girando em torno do Sol;
- Colocou os planetas em ordem de distância ao Sol: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno (Urano, Netuno e Plutão);
- Determinou as distâncias dos planetas ao Sol, em termos da distância Terra-Sol;
- Deduziu que quanto mais perto do Sol está o planeta, maior é sua velocidade orbital.

Dessa forma, o movimento retrógrado dos planetas foi facilmente explicado sem necessidade de epísclos.

Seguindo as tradições das escolas pitagóricas e platônicas, **Johannes Kepler** (1571-1630) foi o primeiro a obter ótimos resultados, tratando de modo mais amplo o aspecto físico-

matemático da teoria do movimento planetário. Partindo das observações de seu antigo chefe e astrônomo dinamarquês **Tycho Brahe** (1546-1601), cuja precisão ultrapassou todas as anteriores, o astrônomo alemão Johannes Kepler, que com a morte de Tycho, agora torna-se seu sucessor, descobriu as três leis que regem o movimento planetário e carregam seu nome. As duas primeiras foram resultado de árdua computação trigonométrica, na qual usou as observações de Marte, realizadas por Tycho Brahe. [7; 9; 11; 14]

3.1.5 As Leis de Kepler e a harmonia do Mundo

Após 4 anos de trabalho, Kepler conseguiu mostrar que, corrigindo a teoria de Copérnico, no sentido de dar ao Sol uma posição central, obtinha-se melhor acordo com a experiência. Mas, para a órbita de Marte, persistia um desvio de 8 minutos de arco. Embora muito pequeno e compatível com a precisão das observações de Copérnico, esse desvio estava em desacordo com a extraordinária precisão das observações de Tycho Brahe, que Kepler sabia serem confiáveis dentro de, pelo menos, 4 minutos de arco. Kepler, diante deste imbrasse, resolveu abandonar qualquer idéia preconcebida – inclusive o programa platônico de explicar tudo em termos de movimentos circulares uniformes – e redeterminar a órbita de Marte. Depois de mais dois anos de trabalho, o resultado obtido foi uma órbita oval em lugar de circular, com o Sol no eixo, mas não no centro. Após várias tentativas de identificar a curva, Kepler acabou descobrindo que a órbita de Marte era uma *elipse*, com o Sol situado num dos focos – e que o mesmo valia para os demais planetas. Surge assim, a primeira lei de Kepler:

Lei das órbitas: *“As órbitas descritas pelos planetas em redor do Sol são elipses com o Sol num dos focos”* [7]

Além de concluir que a órbita de Marte não era circular, Kepler percebeu que o movimento do planeta ao longo da órbita não é uniforme: a velocidade é maior quando ele está mais próximo do Sol. Kepler procurou entender estes resultados em termos de uma ação do Sol como causa dos movimentos dos planetas. Para isso, imaginou um modelo extremamente peculiar, em que o Sol teria uma rotação em torno de seu eixo e emitiria raios confinados ao plano da órbita, que atuariam lateralmente sobre o planeta, “varrendo-o” em torno da órbita. Imaginou assim, uma “força” com todas as características erradas: confinada ao plano da órbita; tangencial à órbita em lugar de central; e supôs, ainda, que variasse inversamente com a distância. Partindo desse modelo inteiramente errado, Kepler fez um cálculo, também errado, das áreas varridas pelo raio vetor que liga cada planeta ao Sol e acabou chegando, miraculosamente, à lei certa. A segunda lei de Kepler:

Lei das áreas: *“O raio vetor que liga um planeta ao Sol descreve áreas iguais em tempos iguais”* [7]

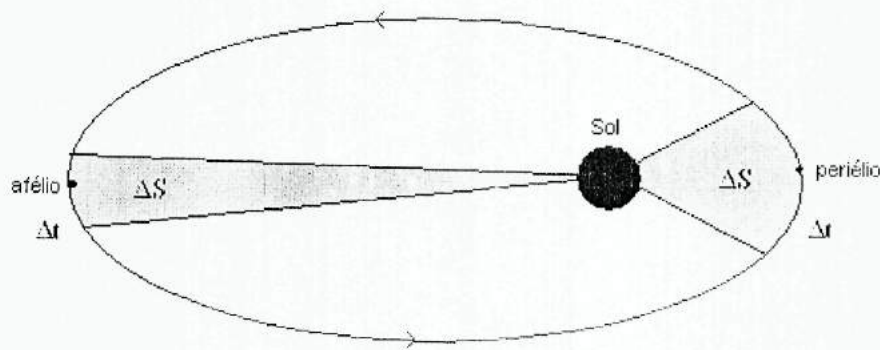


Figura 5: Lei das áreas.

Assim, num dado intervalo de tempo t , o planeta descreve uma porção maior da órbita quando está no **periélio** (posição mais próxima do Sol) do que no **afélio** (posição mais distante do Sol). Kepler acabou percebendo que tinha cometido erros que se cancelavam, e procurou explicar. Mas, a explicação que deu também estava errada!

- Kepler publicou as duas primeiras leis em seu segundo livro “*Astronomia nova*”. Os 70 capítulos de *Astronomia nova* revelaram, em 1609, a tenacidade e a modernidade de Kepler. A cada página descobrimos o caminho até as duas primeiras leis que “liam o pensamento de Deus”.

Kepler, aluno da Terra, toma o céu de assalto.

Não procureis a escada: é a própria Terra que está voando

J. Sessius em Dresden

- Este epigrama aparece no início de *Astronomia nova*, escrito entre 1600 e 1606. O astrônomo vivia então em Praga e não havia dúvidas de que o auxílio e os dados de Tycho Brahe lhe foram determinantes. Kepler fora a Benatek com o intuito de obter novas medidas que lhe conduzissem às proporções exatas do modelo harmonioso esboçado em sua primeira obra “*O mistério*”. Tycho, que havia descoberto as vastas capacidades intelectuais de Kepler, decidira lhe confiar o estudo da órbita de Marte. Ingenuamente, **Kepler** imaginou resolver o problema em alguns dias – foram necessários seis anos de cálculos para elucidar os movimentos do planeta vermelho. O sacrifício valeu a pena: é em *Astronomia Nova* que lemos, de fato, que a Terra se desloca seguindo um movimento que não é uniforme nem circular, em torno de um Sol que gira sobre seu eixo e que é a causa física do movimento dos planetas.

Foi só no fim de sua vida, em 1618, após inúmeras tentativas fracassadas de encontrar alguma regularidade ligando os raios médios das órbitas com os períodos de revolução dos planetas, que ele conseguiu descobrir a regularidade tanto buscada. Esta assume a forma de terceira lei de Kepler:

Lei dos períodos: *“Os quadrados dos períodos de revolução de dois planetas quaisquer estão entre si como o cubo de suas distâncias médias ao Sol”* [7]

Assim, se T_1 e T_2 são períodos de revolução de dois planetas cujas órbitas têm raios médios R_1 e R_2 respectivamente, a 3ª lei afirma que:

$$(T_1/T_2)^2=(R_1/R_2)^3$$

Kepler, diante de sua descoberta: *“A 8 de março deste ano de 1618,... a (solução) apareceu-me na cabeça. Mas eu estava sem sorte, e quando a testei pelo cálculo rejeitei-a como falsa. Afinal, a idéia voltou-me em 15 de maio, e em novo ataque conquistou a obscuridade da minha mente; concordava tão perfeitamente com os dados obtidos em meus dezessete anos de trabalho sobre as observações de Tycho que pensei primeiro estar sonhando...”*.

Kepler publicou sua terceira lei em 1619, no prefácio de seu livro *“Harmonices Mundi”*, onde também escreveu:

“Os dados estão lançados; estou escrevendo este livro – não importa se para ser lido por meus contemporâneos ou pela posteridade. Ele pode esperar 100 anos por um leitor, já que Deus pôde esperar 6.000 anos pelo aparecimento de um contemplador de sua obra”.

O título do livro se refere a uma interpretação literal por Kepler da “harmonia das esferas”, procurando demonstrar que os planetas, em seu movimento, executam uma espécie de música celeste. Cada planeta emitiria uma ou mais notas musicais conforme suas variações de velocidade na órbita. Vênus, com a menor excentricidade, emitiria sempre a mesma nota; Marte, cuja excentricidade na órbita leva a maiores variações de velocidade, emitiria várias notas diferentes. Caracterizando assim, a “melodia celeste”. Os frutos e a significativa influência desta melodia no desenvolvimento do pensamento da época são dignos de um trabalho à parte e não me atreverei a, simplesmente, resumí-los no presente texto. Conto assim, com a saudável curiosidade do professor ou aluno leitor deste texto para colher os referidos frutos nas bibliotecas de obras-raras ou na internet.

Na mesma época de *Astronomia nova*, o astrônomo italiano **Galileu Galilei** (1564-1642) dirigiu seu telescópio, construído em 1609, para o céu e descobriu, em rápida sucessão: os

mares, as crateras e outras formações montanhosas da Lua; os quatro satélites maiores de Júpiter e sua revolução livre em torno do planeta; a primeira indicação dos anéis de Saturno e as manchas solares. Estudando Vênus, descobriu que este planeta mostrava “fases”, como a Lua: ora aparecia como um círculo, ora como semicírculo, em “quarto minguante”, etc... Por conseguinte, não tinha luz própria: refletia a luz do Sol. Estas observações contradiziam as idéias de Ptolomeu, segundo o qual a órbita de Vênus deveria ser um epiciclo inteiramente contido entre o Sol e a Terra, o que levaria Vênus a aparecer sempre da mesma forma, como um crescente iluminado (ilustração 2) sem mostrar “fases”.

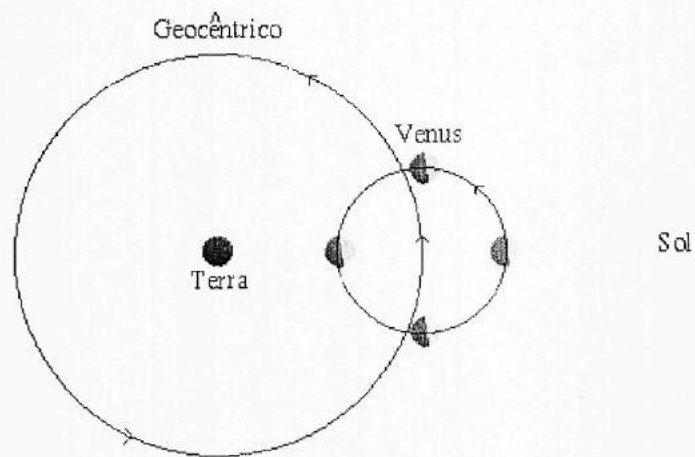


Ilustração 2: Trajetória de Vênus, segundo Ptolomeu [13]

Galileu publicou essas observações em 1610, em seu livro “*Sidereus Nuncius*” (“O Mensageiro das Estrelas”).

3.1.6 Da condenação de Galileu à lei da Gravitação Universal de Newton

Com a ascensão do novo Papa Urbano VIII, que tinha demonstrado interesse pela astronomia e pelas descobertas de Galileu, este acabou decidindo-se a publicar, em 1632, seu “*Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo*, o Ptolomaico e o Copernicano”, defendendo o ponto de vista de Copérnico. Isto violava uma proibição do Papa anterior. Galileu também colocou o argumento predileto de Urbano VIII em defesa de Ptolomeu na boca da personagem Simplício, cujo nome era bem representativo do papel que desempenhava na obra. A divulgação e a defesa do heliocentrismo iriam levar Galileu a ser julgado pelo Santo Ofício e condenado a prisão domiciliar perpétua, quando já contava mais de setenta anos. A razão da proibição da Igreja ao heliocentrismo era que no Salmo 104:5 do Antigo Testamento da Bíblia, está escrito: *Deus colocou a Terra em suas fundações, para que nunca se mova.* (Em nossa tradução: “Lançou os fundamentos da Terra, para que não vacile em tempo algum”)[15].

No dia 22 de junho de 1632, o acusado foi transferido para a Santa Maria della Minerva e informado de que era “fortemente suspeito de heresia” e, portanto, passível das penas prescritas “contra tais delinqüentes”. Os *Diálogos* foram proibidos e Galileu, condenado à prisão, obrigado a ler em público um ato de abjuração. O texto dessa abjuração, particularmente em sua conclusão, constitui um documento sobre o qual se deve meditar:

“(...) com sinceridade e fé verdadeira abjuro, amaldiçoão e esconjuro os citados erros e heresias e, de modo geral, quaisquer que sejam, outros erros, heresias e seitas contrárias à Santa Igreja, e juro que no futuro nunca mais direi nem afirmarei, verbalmente nem por escrito, nada que proporcione motivo para semelhante suspeita a meu respeito; além disso, se souber de um herege ou suspeito de heresia, denuncia-lo-ei a este Santo Ofício ou ao Inquisitor ou Ordinário do lugar em que me encontrar. Também juro e prometo cumprir e observar, na íntegra, todas as penas que foram, ou que serão, impostas a mim por este Santo Ofício. E, no caso de faltar a qualquer dessas minhas promessas e juramentos, o que não preza a Deus, submeter-me-ei a todas as dores e penas impostas e promulgadas nos cânones sagrados e outras constituições, gerais e particulares, contra tais delinqüentes. Valham-me Deus e estes Seus Santos Evangelhos, que toco com minhas mãos”.

Os textos oficiais da condenação e da abjuração foram divulgados nas escolas e universidades à guisa de advertência a todos. Aproveitou os nove anos que lhe restaram para escrever e fazer publicar clandestinamente sua grande obra “*Diálogos sobre duas novas ciências*”. Na margem de uma página do seu próprio exemplar dos *Diálogos sobre os dois principais sistemas do mundo* encontra-se a seguinte anotação de Galileu:

“Quanto à introdução de novidades. Quem pode duvidar que leve às piores desordens quando mentes que Deus criou livres são compelidas à submissão escrava a uma vontade externa? Quando nos dizem que devemos negar a evidência de nossos sentidos e sujeitá-los ao capricho de outros? Quando pessoas sem qualquer competência são tomadas juízes de peritos e se lhes outorga autoridade para tratá-los como lhes aprouver? São essas as novidades capazes de levar à ruína das comunidades e à subversão do Estado”.



Ilustração 3: Galileu depondo ante a Inquisição Romana, sob acusação de heresias-1633 [14].

Galileu^{††} morreu no ano de 1642, amargurado e cego, sob prisão domiciliar, em Florença, nos primeiros dias de janeiro, cercado por poucos discípulos ainda fiéis. Em dezembro do mesmo ano, no dia de Natal, nasceu em Woolsthorpe, em Linconshire, Inglaterra, uma criança com o nome de **Isaac Newton**. [9]

^{††} Apenas em 1980, o Papa João Paulo II (**Karol Joseph Wojtyła**) (1920-2005) ordenou um re-exame do processo contra Galileu, o que acabou por eliminar os últimos vestígios de resistência, por parte da igreja Católica, à revolução Copernicana.

A condição de já ter nascido órfão de pai, tendo que dividir as atenções da mãe com um padrasto rico, porém pouco amável, tornou Newton um menino tímido, introvertido, de poucos amigos e, posteriormente, um homem neurótico, de alma atormentada. Já o segundo fato fez com que herdasse considerável patrimônio material, o que permitiu-lhe dedicar-se inteiramente ao “saber”. Conseguiu entrar em Cambridge em 1661. Quando se bacharelou em 1665, Isaac Barrow, seu professor de matemática, encorajou-o a permanecer em Cambridge. A peste que se alastrou, dizimando cerca de 70.000 pessoas e, no ano seguinte, o Grande incêndio de Londres, que atingiu dois terços daquela cidade poluída e com péssimo saneamento, causou pânico em toda a população. A peste provocou o fechamento da Universidade, e Newton refugiou-se em sua fazenda de Woolsthorpe. Uma descrição do que fez nesse período foi dada, por ele próprio, cinquenta anos mais tarde:

“No princípio de 1665, achei o método para aproximar séries e a regra para reduzir qualquer potência de um binômio a uma tal série” (binômio de Newton e série binomial). “No mesmo ano, em maio, achei o método das tangentes de Gregory e Slusius” (fórmula de interpolação de Newton) “e em novembro, o método direto das fluxões” (cálculo diferencial); “no ano seguinte, em janeiro, a teoria das cores” (experiências com o prisma sobre decomposição da luz branca), “e em maio, os princípios do método inverso das fluxões” (cálculo integral), “e no mesmo ano comecei a pensar na gravidade como se estendendo até a órbita da Lua, e, da Lei de Kepler sobre os períodos dos planetas... deduzi que as forças que mantêm os planetas em suas órbitas devem variar inversamente com os quadrados de suas distâncias aos centros em torno dos quais as descrevem: tendo então comparado a força necessária para manter a Lua em sua órbita com a força da gravidade na superfície da Terra, e encontrado que concordavam bastante bem. Tudo isso foi feito nos dois anos de peste, 1665 e 1666. pois naqueles dias eu estava na flor da idade para invenções, e me ocupava mais de matemática e filosofia” (Física) “do que em qualquer época posterior”.

→ Para efetuar o cálculo da “força gravitacional” a que se refere – assim deixa a entender –, Newton já devia dispor da formulação dos princípios fundamentais da dinâmica, embora não se refira explicitamente a isso. Todos esses resultados foram obtidos por Newton, entre 23 e 24 anos de idade! Entende-se que ele tenha sido considerado, por Hume^{‡‡}, o maior gênio que a espécie humana já produziu.

Em 1687, Isaac Newton publica sua maior obra: *“Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica”* (*Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*) [16], no qual estabelece as categorias para o desenvolvimento de uma filosofia natural mecanicista: As três leis da

^{‡‡} David Hume, filósofo escocês (1711-1776)

Mecânica, os conceitos de *força*, *massa* e o tratamento de trajetórias curvas. A **Lei da Gravitação Universal** é formulada apenas na última parte do livro e traduzida pela expressão:

$$F = -G \frac{mM}{R^2} \mathbf{r}$$

Onde **F** representa a força gravitacional entre dois corpos de massas *m* e *M*, separados por uma distância *R* e **r** é o vetor unitário na direção que liga os centros dos dois corpos (direção em que age a força).

Newton, nos *Princípios*, expressou o conteúdo dos princípios da dinâmica,

1º) **Princípio da inércia:** *Existem partículas livres e referenciais inerciais; em relação a um referencial inercial qualquer partícula livre está em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme.*

2º) **Princípio do isolamento:** *O movimento de uma partícula não é influenciado por partículas infinitamente distantes dela.*

3º) **Princípio do determinismo newtoniano:** *O movimento de cada partícula de um sistema isolado é determinado univocamente pelas posições e velocidades das partículas do sistema em um instante fixo qualquer.*

4º) **Princípio da superposição:** *A aceleração de uma partícula sob a influência de diversas outras, em um certo instante, é a soma vetorial das acelerações que a partícula teria, no instante considerado, se cada uma das outras estivesse sozinha influenciando-a.*

5º) **Princípio da proporcionalidade das acelerações:** *As acelerações simultâneas, \mathbf{a}_i e \mathbf{a}_j , das partículas *i* e *j* de um par isolado, têm sempre a mesma direção e sentidos opostos e a razão entre seus módulos é uma constante.*

na forma das três leis que levam o seu nome e que ele enunciou da seguinte forma [16]:

LEX I. *Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.*

LEX II. *Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressa, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.*

LEX III. *Actioni contrariam semper & æqualem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse æquales & in partes contrariam dirigi.*

Essas três leis podem ser traduzidas para o português na forma que segue [17]:

Lei I. Todo corpo permanece em estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas nele.

Lei II. A mudança do movimento é proporcional à força motriz impressa e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime essa força.

Lei III. A uma ação sempre se opõe uma reação igual, ou seja, as ações de dois corpos um sobre o outro sempre são iguais e se dirigem a partes contrárias.

Devido ao seu poder explicativo, à sua profundidade e abrangência, à variedade de suas aplicações e ao seu impacto nas ciências e na cultura, essas três leis e a obra na qual aparecem podem ser consideradas umas das maiores glórias do pensamento humano.

3.2: Importância histórico-científica dos eclipses

Há toda uma mística rodeando este incrível fenômeno da natureza desde os tempos mais antigos. Uma lenda chinesa diz que o eclipse ocorre porque um enorme dragão devora o Sol; já para os egípcios, o malfeitor seria a serpente Apófis, inimiga de Rá, o deus-sol. Às vezes, Apófis coloca-se no caminho de Rá para promover o combate; os escandinavos acreditavam que dois enormes lobos, Sköll e Hati, perseguiam o Sol e a Lua. O segundo, também chamado Managarm, o cão da Lua, acaba devorando o astro noturno no final dos tempos. Enquanto que na Roma antiga, os habitantes tinham o costume de gritar em voz alta, a fim de socorrer o Sol eclipsado, para chamar de volta o astro quase desaparecido. [18]

Os eclipses, estudados desde épocas remotas, conduziram o homem às suas primeiras deduções científicas. Os eclipses da Lua forneceram a primeira prova da redondeza da Terra. Foram utilizados no estudo da alta atmosfera terrestre, que difunde parcialmente as radiações solares, no estudo do movimento de **rotação** da Terra e, também, para medir a aceleração secular da Lua. Aliás, esses dois setores se desenvolveram, principalmente, por intermédio das análises das observações de ocultações de estrelas pela Lua; estas análises têm fornecido elementos preciosos sobre o meio de determinar as irregularidades do movimento da Lua.

Os eclipses do Sol constituem, como os da Lua, um elemento fundamental para os historiadores na determinação da correspondência entre os diferentes calendários e na retificação de algumas cronologias antigas. Entretanto, a principal contribuição científica dos eclipses solares foi desenvolvida durante os eclipses totais do Sol, cujo primeiro registro de observação data de 1375 a.C, na Mesopotâmia, que propiciaram magníficos estudos da atmosfera solar. Até 1930, quando da invenção do coronógrafo do astrônomo francês **Bernard Lyot** (1897-1952), o único meio existente para observar a coroa solar era o eclipse total do Sol. [10]

Os eclipses são ainda observados com atenção para o estudo da cromosfera solar, da sua coroa e, principalmente, para o estudo das influências dos fluxos solares na atmosfera terrestre. Outra importante observação é a do desvio ou *efeito Einstein* sobre as estrelas, aparentemente, circunvizinhas do Sol, durante os eclipses. Ficou célebre a expedição realizada pelos astrônomos a Sobral, no Ceará, para a observação do eclipse total do Sol de 29 de maio de 1919, pois dele resultaram as primeiras determinações do *efeito Einstein*, predito pela teoria da relatividade geral, proposta pelo físico alemão **Albert Einstein** (1879-1955) no ano de 1906.

Uma das conseqüências dessa teoria é que um raio de luz passando através de um campo gravitacional intenso se desviaria de certo ângulo, cujo valor poderia ser calculado. A melhor

maneira de comprovar se tal desvio realmente se verifica consistia em fotografar as estrelas de uma determinada região do céu, onde mais tarde se encontrasse o Sol, quando se desse um eclipse total e fotografar, novamente, a mesma região no momento do eclipse. [14]

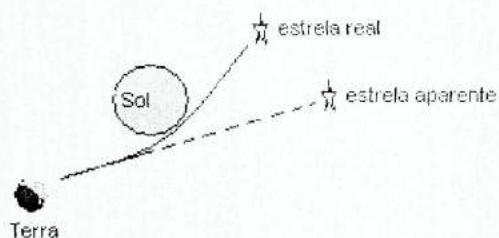


Figura 6: Efeito Einstein. Eclipse de Sobral (CE)-1919.

Se o desvio previsto se desse na realidade, a comparação das posições das estrelas fotografadas nessas duas ocasiões permitiria comprovar experimentalmente a sua existência e verificar se o valor previsto pelo cálculo coincidia com o observado. As fotografias obtidas confirmaram a teoria, tendo sido essa a primeira e talvez a mais clara verificação experimental da teoria da relatividade geral.

4 TEORIA DOS ECLIPSES

Um **eclipse** acontece sempre que um corpo entra na sombra de outro. Assim, quando a Lua entra na sombra da Terra, acontece um **eclipse lunar**. Quando a Terra é atingida pela sombra da Lua, acontece um **eclipse solar**.

Quando um corpo extenso (não pontual) é iluminado por outro corpo extenso definem-se duas regiões de sombra:

- **umbra**: região da sombra que não recebe luz de nenhum ponto da fonte.
- **penumbra**: região da sombra que recebe luz de alguns pontos da fonte.



Ilustração 4: Umbra e Penumbra [14]. (Eclipse Solar)

A órbita da Terra em torno do Sol, e a órbita da Lua em torno da Terra, não estão no mesmo plano. Se estivessem, ocorreria um eclipse da Lua a cada Lua Cheia, e um eclipse do Sol a cada Lua Nova. Como ilustra a figura abaixo:

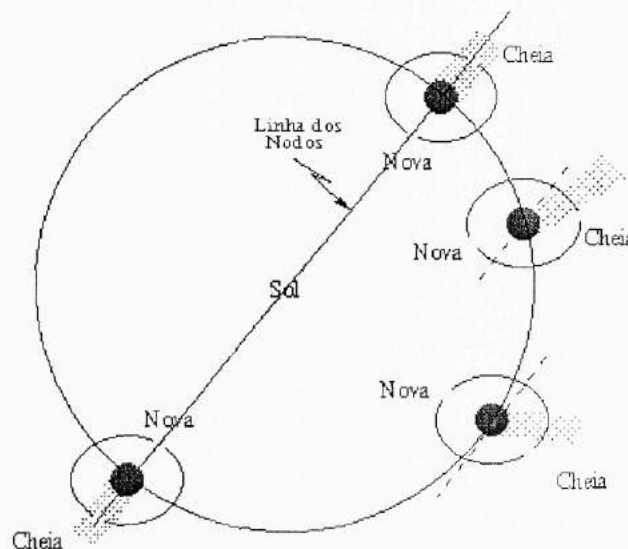


Ilustração 5: Eclipses se Sol, Terra e Lua estivessem no mesmo plano [14]. Vale ressaltar que se não estivessem no mesmo plano não haveria linha dos nodos.

O plano da órbita da Lua está inclinado $5,2^\circ$ em relação ao plano da órbita da Terra (ver figuras 7.a e 7.b). Portanto só ocorrem eclipses quando a Lua está na fase de Lua Cheia ou Nova, e quando o Sol está sobre a *linha dos nodos*, que é a linha de interseção do plano da órbita da Terra em torno do Sol com o plano da órbita da Lua em torno da Terra.

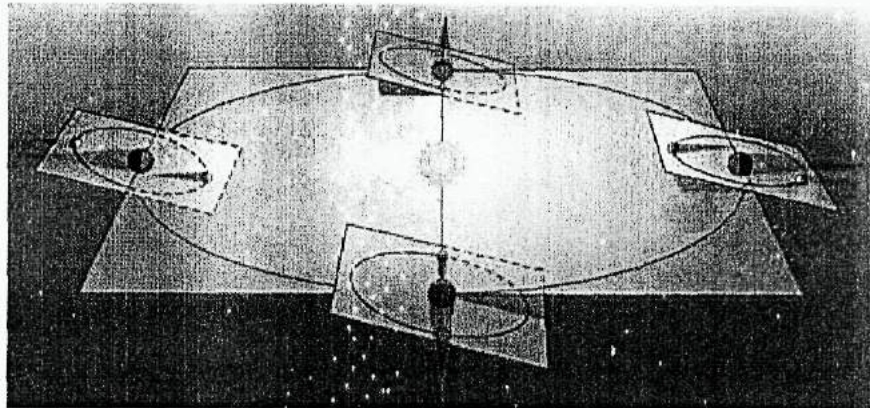


Figura 7.a: Órbitas da Lua e da Terra. Note que os planos são distintos.

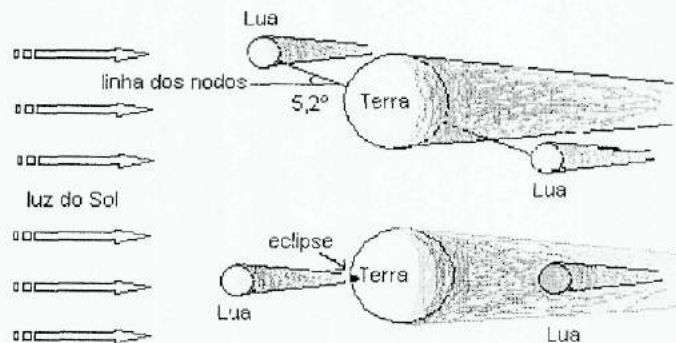


Figura 7.b: Condições para haver Eclipses.

Durante um **eclipse solar**, a umbra da Lua na Terra (sombra) tem sempre menos que 270 km de largura. Como a sombra se move a pelo menos 34 km/min para Leste, devido à órbita da Lua em torno da Terra, o máximo que um eclipse dura é $7 \frac{1}{2}$ minutos. Portanto um **eclipse solar total** só é visível, se o clima permitir, em uma estreita faixa sobre a Terra, chamada de caminho do eclipse. Em uma região de aproximadamente 3000 km de cada lado do caminho do eclipse, ocorre um eclipse parcial. [13] (Figuras 8.a e 8.b)

Um **eclipse total da Lua** acontece quando a Lua fica inteiramente imersa na umbra da Terra; se somente parte dela passa pela umbra, e o resto passa pela penumbra, o **eclipse é parcial**. Se a Lua passa somente na penumbra, o eclipse é penumbral. Um eclipse total é sempre acompanhado das fases penumbral e parcial. Um **eclipse penumbral** é difícil de ver diretamente com o olho, pois o brilho da Lua permanece quase o mesmo. Durante a fase total, a Lua aparece com uma luminosidade tênue e avermelhada. Isso acontece porque parte da luz solar é refratada na atmosfera da Terra e atinge a Lua. Porém essa luz está quase totalmente desprovida dos raios azuis, que sofreram forte espalhamento e absorção na espessa camada atmosférica atravessada (Figuras 9.a e 9.b).

4.1: Eclipses do Sol

Para que um eclipse do Sol ocorra é necessário que a Lua esteja em conjunção e não muito afastada de um dos nodos da sua órbita, isto é, de um dos pontos em que ela intercepta a órbita da Terra. Tais circunstâncias favoráveis ocorrem várias vezes por ano e, assim, todos os anos há eclipses do Sol, visíveis de um ou outro lugar da Terra. Quando as circunstâncias são mais favoráveis, pode haver até cinco eclipses do Sol no mesmo ano; caso contrário, haverá apenas dois. Sendo o eclipse do Sol provocado pela projeção da sombra da Lua sobre a Terra, é evidente que esse eclipse não pode ser observado, ao mesmo tempo, de todos os pontos do globo que tenham, nesse momento, o Sol acima do horizonte; além disso, o aspecto do eclipse varia conforme o local de onde é observado.

A Lua projeta, do lado oposto ao Sol, um cone de sombra que pode cortar a superfície da Terra (ver fig. 8.a); há, então, o eclipse total do Sol para todos os pontos do globo que se acham na interseção da primeira folha do cone com a Terra. É o que se passa quando o diâmetro da Lua, visto da superfície da Terra, é maior que o Sol.

Pode acontecer, ainda, que o vértice do cone não atinja a superfície do globo terrestre; há, então, o eclipse anular para a região do globo que se acha na interseção da superfície da Terra com a segunda folha do cone de sombra. Será observado, portanto, de um ponto dessa região, o disco lunar projetando-se sobre o Sol. É o que se dá quando o diâmetro aparente da Lua, visto da superfície da Terra, é menor que o do Sol. As figuras 8.a e 8.b, a seguir comparam o eclipse total com o eclipse anular do Sol, assim como o aspecto do Sol (da coroa solar), quando observado da região eclipsada, em cada um dos casos.

(8.a) Eclipse Solar Total [13]

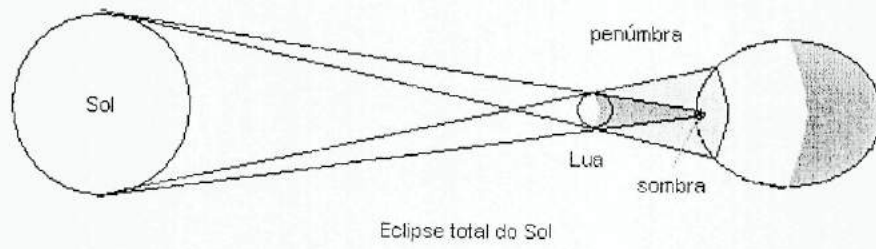


Figura 8.a.1

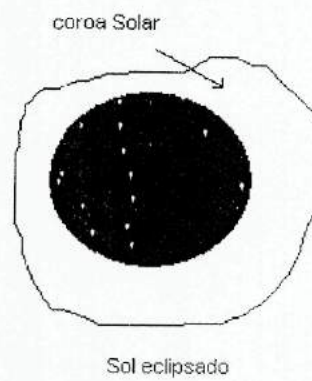


Figura 8.a.2

(8.b) Eclipse anular [13]

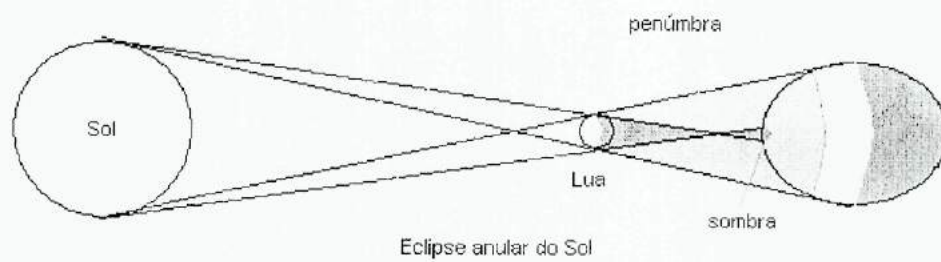


Figura 8.b.1

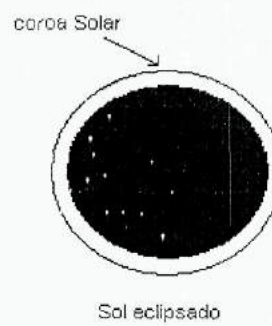


Figura 8.b.2

4.2: Eclipses da Lua

Os eclipses da Lua, embora se dêem em menor número que os do Sol, são, contudo, em cada lugar da Terra, muito mais comuns. Com efeito, um determinado eclipse do Sol só pode ser observado nos lugares onde a sombra da Lua atinge a Terra, e esses lugares estão contidos numa zona relativamente pequena da superfície do globo terrestre. Enquanto que um **eclipse lunar** ocorre quando a Lua entra na sombra da Terra.

À distancia da Lua, 384 mil km, a sombra da Terra, que se estende por 1.4 milhões de km, cobre aproximadamente 4 luas cheias. Em contraste com um eclipse do Sol, que só é visível em uma pequena região da Terra, um eclipse lunar é visível por todos que possam ver a Lua.

Como um eclipse da Lua pode ser visto, se o clima permitir, de toda a parte noturna da Terra, eclipses da Lua são muito mais freqüentes que eclipses do Sol, de um dado local na Terra. A duração máxima de um eclipse lunar é 3,8 horas, e a duração da fase total é sempre menor que 1,7 horas. [13]

Existem três tipos de eclipses lunares:

- I. Eclipse penumbral: Quando a Lua atravessa somente o cone de penumbra da Terra;
- II. Eclipse parcial: Quando a Lua penetra parcialmente no cone de sombra (umbra) da Terra;
- III. Eclipse total: Quando a Lua imerge, completamente, no cone de sombra da Terra.

O eclipse lunar começa pela entrada da Lua no cone de penumbra, fase de difícil observação, pois somente após haver ultrapassado a metade da penumbra é que se começa a distinguir um ligeiro obscurecimento na superfície lunar (figura 9.a).

À medida que se desenvolve o eclipse, o obscurecimento se acentua. Ao atingir o cone de sombra, o que constitui o primeiro contato, isto é, o momento em que o limbo da Lua tangencia o cone de sombra, a Lua se apresenta, de início, “mordida”. Daí em diante a região escura vai se estendendo na superfície da Lua e se tornando cada vez mais intensa. Na fase de totalidade (fig. 9.b), observa-se uma coloração avermelhada, oriunda da difusão da luz solar nas altas camadas da atmosfera terrestre.

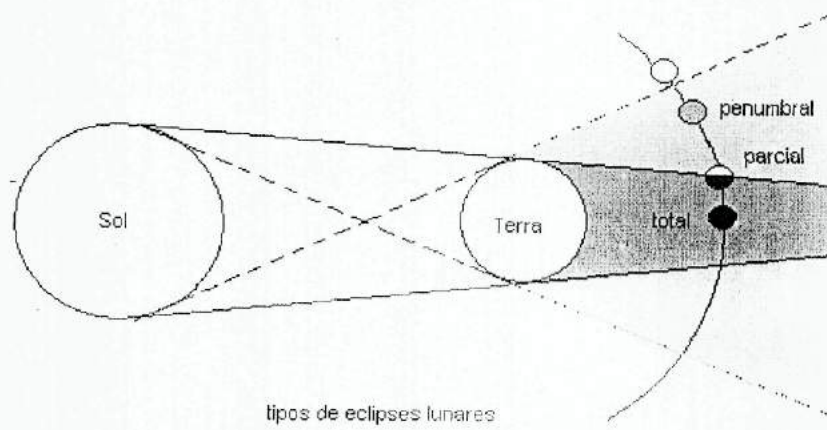


Figura 9.a

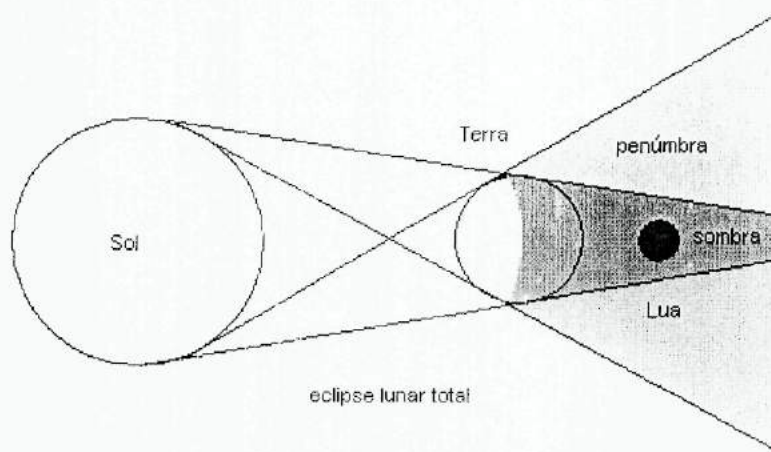


Figura 9.b

4.3: Uma estimativa grosseira

Para simplificar algumas contas, nos passos seguintes estaremos considerando que o plano da órbita da Lua ao redor da Terra coincide com o plano do equador terrestre. Esta aproximação não é, exatamente, verdadeira mas pode nos dar uma idéia do que, de fato, acontece. Como a Lua se move aproximadamente 12° por dia, **para leste**, em relação ao Sol ($360^\circ/29,5$ dias = $12^\circ/\text{dia}$), temos que sua velocidade é da ordem de:

$$(12^\circ/360^\circ.\text{dia}) \times 2\pi \times 384000\text{Km} \approx 80400\text{Km}/\text{dia} \approx 56\text{Km}/\text{min}.$$

Temos ainda, que a velocidade de um ponto na linha do Equador, devido à rotação terrestre **para leste** é da ordem de:

$$(2\pi R\theta/\text{dia}) = 2\pi \times 6370 \text{ Km}/24\text{h} = 1667 \text{ Km}/\text{h} \approx 28 \text{ Km}/\text{min}$$

Como a velocidade da Lua no céu é maior do que a velocidade de rotação da Terra, a velocidade da sombra da Lua na Terra tem o mesmo sentido do movimento (real) da Lua, ou seja, para leste. O valor da velocidade da sombra é, grosseiramente:

$$56 \text{ Km}/\text{min} - 28 \text{ Km}/\text{min} = 28 \text{ Km}/\text{min}$$

Cálculos mais precisos, levando-se em conta o ângulo entre os dois movimentos, mostram que a velocidade da Lua em relação a um certo ponto da Terra é de pelo menos 34 km/min para leste. A duração da totalidade do eclipse, em um certo ponto da Terra, será o tempo desde o instante em que a borda leste da umbra da Lua toca esse ponto até o instante em que a borda oeste da Lua o toca. Esse tempo é igual ao tamanho da umbra dividido pela velocidade com que ela anda. Aproximadamente, teremos:

$$270\text{Km}/34\text{Km}/\text{min} = 7.9 \text{ min}$$

Na realidade, a totalidade de um eclipse dura no máximo 7 1/2 minutos. Um eclipse solar total começa quando a Lua alcança a direção do disco do Sol, e aproximadamente uma hora depois o Sol fica completamente atrás da Lua. Nos últimos instantes antes da totalidade, as únicas partes visíveis do Sol são aquelas que brilham através de pequenos vales na borda irregular da Lua, um fenômeno conhecido como "anel de diamante", já descrito por **Edmund Halley** no eclipse de 3 de maio de 1715. Durante a totalidade, o céu se torna escuro o suficiente para se observar os planetas e as estrelas mais brilhantes. Após a fase de "anel de diamante", o disco do Sol fica completamente coberto pela Lua, e a *coroa* solar, a atmosfera externa do Sol, composta de gases rarefeitos que se estendem por milhões de quilômetros, aparece.

4.4: Eclipses recentes

Como o sistema Terra-Lua orbita o Sol, aproximadamente duas vezes por ano a linha dos nodos está alinhada com o Sol e a Terra. Estas são as temporadas dos eclipses, quando os eclipses podem ocorrer. Quando a Lua passar pelo nodo durante a temporada de eclipses, ocorre um eclipse. Como a órbita da Lua gradualmente gira sobre seu eixo (com um período de 18,6 anos de regressão dos nodos), as temporadas ocorrem a cada 173 dias, e não exatamente a cada meio ano. A distância angular da Lua ao nodo precisa ser menor que $4,6^\circ$ para um eclipse lunar total, e menor que $10,3^\circ$ para um eclipse solar total, o que estende a temporada de eclipses para 31 a 38 dias, dependendo dos tamanhos aparentes e velocidades aparentes do Sol e da Lua, que variam porque as órbitas da Terra e da Lua são elípticas, de modo que pelo menos um eclipse ocorre a cada 173 dias.

Entre dois e sete eclipses ocorrem anualmente. Usualmente eclipses ocorrem em conjuntos de 1 a 3, separados por 173 dias $[(1 \text{ ano} - 20 \text{ dias})/2]$. Em um conjunto, ou só ocorre um eclipse solar, ou uma sucessão de eclipse solar, lunar e solar novamente. Em um ano, dois ou três destes conjuntos ocorrem.

Em 2005 os eclipses foram:

- 8 de abril de 2005 - eclipse solar anular / total (híbrido)
- 24 de maio de 2005 - eclipse lunar penumbral
- 3 de outubro de 2005 - eclipse solar anular
- 17 de outubro de 2005 - eclipse lunar parcial

Por não termos a oportunidade de apreciar um eclipse solar todos os dias, convém finalizarmos esta discussão teórica “agendando” uma olhada nos próximos eclipses pelo mundo...

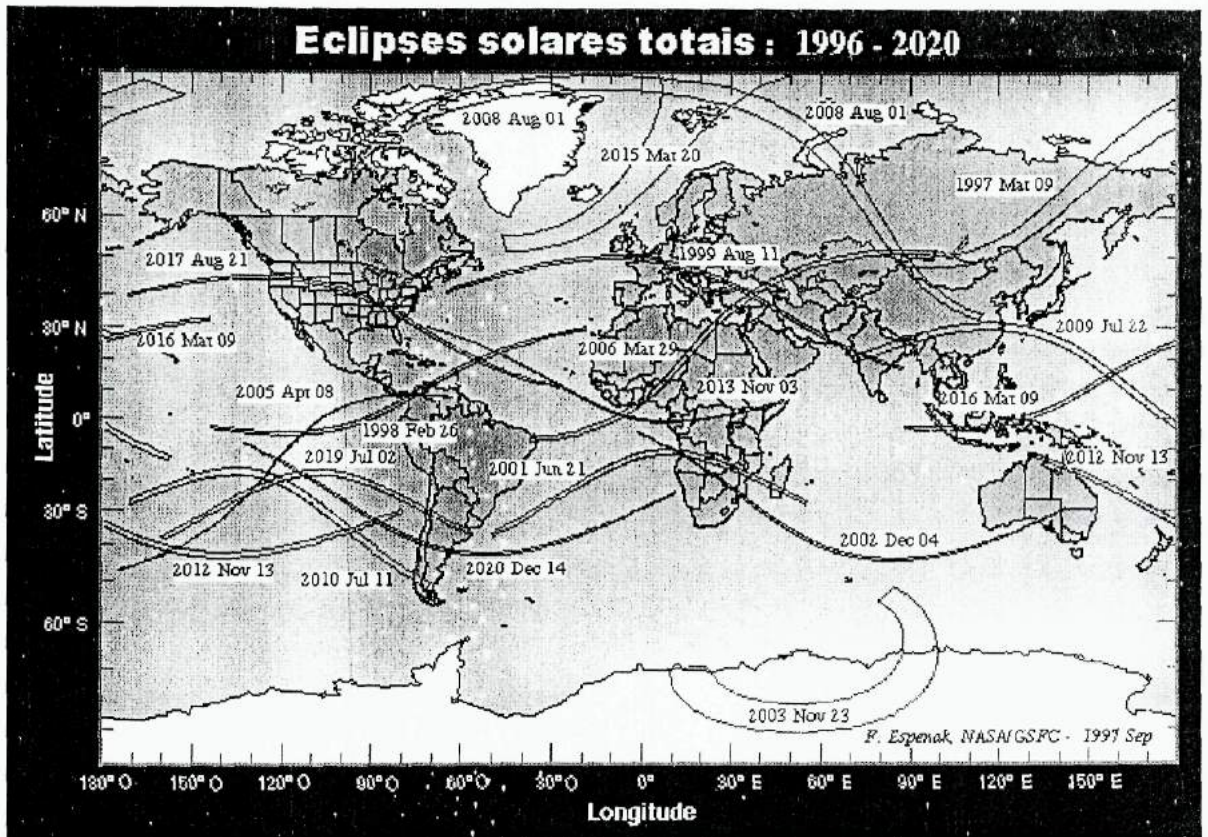


Ilustração 6: Eclipses Solares totais de 1996 a 2020. [18]

5. MODELO EXPERIMENTAL

5.1: Objetivos

5.1.1: Objetivo Geral

Este experimento tem o objetivo de introduzir, explicar e demonstrar, de forma clara e didaticamente viável, os principais aspectos relacionados àqueles fenômenos conhecidos por estarem, sem dúvida alguma, entre os mais fascinantes da natureza, os Eclipses.

5.1.2: Objetivos secundários

É claro que não iremos nos restringir aos mecanismos envolvidos na ocorrência dos Eclipses. Deveremos, aqui, buscar despertar o interesse e a curiosidade do aluno acerca do tema, aproveitando, posteriormente, essa disponibilidade para discutirmos outros pontos importantes ligados aos movimentos dos astros, tais como, rotação, translação, precessão, dias e noites, marés, fases da Lua, estações do ano etc.

5.2: Material Utilizado

5.2.1. Material principal

O principal material utilizado, neste experimento, é um pequeno modelo, extremamente simplificado, do sistema Sol-Terra-Lua.

Constituído basicamente de uma lâmpada, dois eixos de rotação, um globo de abajur, uma bolinha de isopor e um pequeno mapa mundial esférico, esse modelo possui caráter unicamente ilustrativo e não nos preocuparemos, demasiadamente, com questões relacionadas às proporções de dimensões - uma vez que um tratamento dessa natureza tornaria inviável a simultânea demonstração dos efeitos; por exemplo, os Eclipses, mencionados anteriormente.

5.2.2. Material secundário

Além do modelo em si, propomos ao professor que prepare um texto extra para distribuição entre os alunos. Este poderá conter, nesta ordem: (a) questões teóricas simples, relacionadas ao assunto de interesse (os alunos deverão buscar responder a essas questões de forma experimental; i.e, usando o modelo, com auxílio do professor para o manuseio do mesmo); (b) teoria física (conteúdo curricular em si) e (c) questões mais elaboradas, relacionadas ao conteúdo e ao gabarito.

5.3: Descrição e montagem do modelo

O modelo interessante pode ser construído ao dispormos de uma base de madeira, interruptor, fio, uma haste cilíndrica de madeira, um globo de abajur, um círculo de madeira ou de plástico (para fechar a base do globo), uma lâmpada, um mapa mundial esférico, uma bolinha de isopor e cartolina para o acabamento de arte final.

Uma haste cilíndrica, que está apoiada na base, sustenta a lâmpada. Esta, por sua vez, encontra-se dentro do globo de abajur e o acender e apagar da lâmpada pode ser controlado pelo interruptor. Essa mesma haste serve de eixo de rotação para uma “ripa” de madeira ou outro material, conectada perpendicularmente ao eixo por uma de suas extremidades. Na outra extremidade da ripa, encontra-se mais uma articulação de onde sai uma pequena barra de metal, cuja função é apoiar a bolinha de isopor. Esta fará o papel de Lua. O mapa mundial ficará apoiado acima dessa articulação, com o auxílio de um eixo cujo ângulo sólido, em relação à vertical, é fixo, mas pode ser móvel em torno do cone determinado por esse ângulo. Este será a “nossa” Terra.

Eis uma fotografia do equipamento, já pronto:

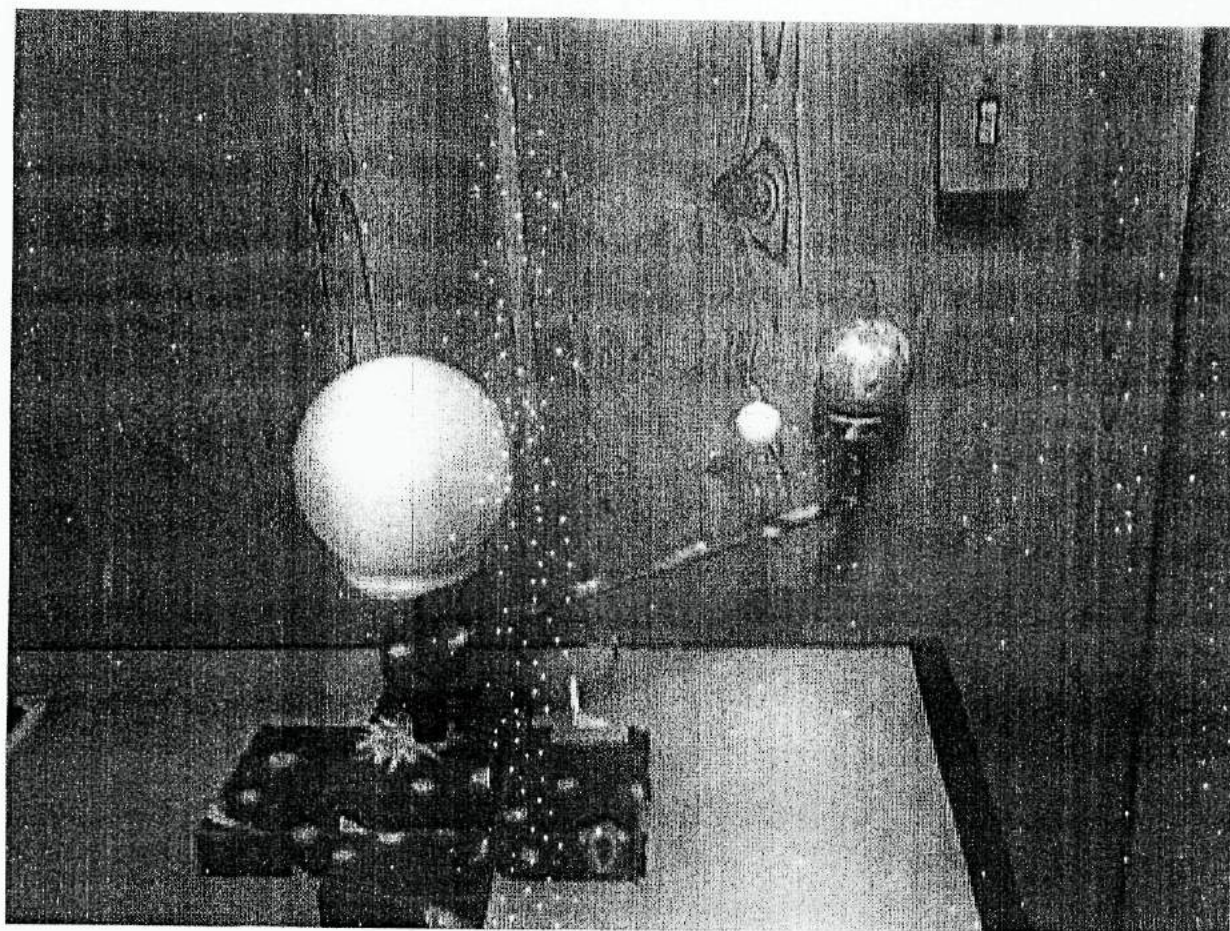


Ilustração 7.

5.4: Roteiro Experimental

A seguir, apresentamos alguns procedimentos, os quais servirão para familiarizar os professores com o manuseio do modelo e, conseqüentemente, ajudá-los à utilizar o modelo de uma forma mais eficiente em suas explicações. Principalmente no que diz respeito ao questionário didático presente na seção 7.

➤ **Procedimento I: Rotação, Translação e Precessão.**

Os movimentos de Rotação, Translação e Precessão podem ser demonstrados separadamente e/ou em conjunto. Uma primeira demonstração separada, pode facilitar o entendimento do movimento conjunto. Mantendo-se os três eixos (ver ilustração abaixo) fixos e fazendo-se a “Terra” girar em torno do eixo 1, mostra-se a rotação do planeta; A translação é ilustrada ao mover-se, apenas, o eixo 3, enquanto verifica-se a precessão através do movimento do eixo 1 em torno da vertical (fig. 10).

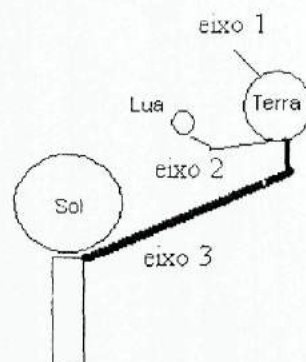


Figura 10.

Após a apresentação destes principais movimentos, podemos fazer a composição dos três, simplesmente executando, simultaneamente, as etapas discutidas acima.

➤ **Procedimento II: Eclipses do Sol.**

Movendo o eixo 2, posiciona-se a “Lua” numa posição tal que ela fique, exatamente, entre o “Sol” e a “Terra”. É possível, nesta situação, observar a sombra da Lua projetada sobre a Terra. Esta região ilustra um eclipse solar (fig. 11).

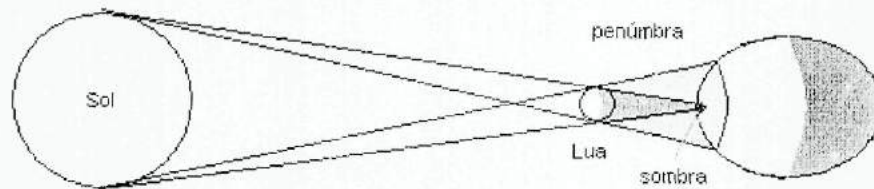


Figura 11

➤ **Procedimento III: Eclipses da Lua.**

Analogamente ao procedimento II, agora posicionamos a Lua numa posição tal que a Terra fique, exatamente, entre o Sol e a Lua. Nesta situação, é possível observar que a Terra impede os raios solares de chegarem até a Lua. Isto ilustra um eclipse lunar (fig. 12).

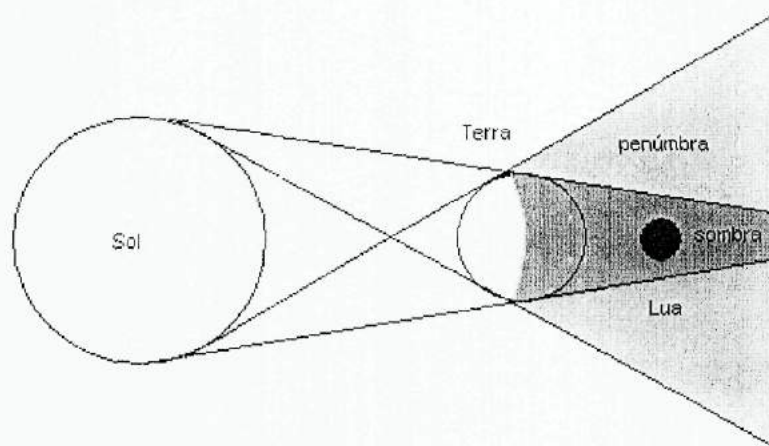


Figura 12.

➤ **Procedimento IV: Dias e Noites.**

Uma simples e imediata observação do modelo já revela duas regiões referentes à Terra. A região de frente ao Sol é iluminada, a outra não é iluminada. Essas regiões definem, respectivamente, o dia e a noite terrestre. Neste momento os alunos deverão estar aptos a deduzirem: Eclipses solares só ocorrem durante o dia, enquanto os eclipses lunares ocorrem durante a noite.

6. PLANOS DE AULA

O conteúdo será abordado em três aulas, de 50 min, ^{min} (cinquenta minutos) cada, com o detalhamento a seguir:

6.1: Aula 1

6.1.1. TEMA

O conteúdo está inserido no tema “Movimentos Planetários & Eclipses”.

6.1.2. PRESSUPOSTOS CONCEITUAIS NECESSÁRIOS

Supõe-se que o aluno traz, da abordagem sobre Leis de Newton no Ensino Médio, conceitos bem fundamentados de referenciais inerciais, sistemas de referência e trajetória. Além de noções acerca de movimentos curvilíneos, o aluno deve estar familiarizado com princípios básicos de óptica geométrica, tais como raio luminoso, propagação retilínea da luz, reversibilidade, independência dos raios luminosos e possuir noções sobre lentes (formação de imagens).

6.1.3. OBJETIVOS

Ao final da aula, o aluno deverá estar apto a:

- ✓ Caracterizar a estrutura de nosso sistema solar do ponto de vista dos modelos geocêntrico e heliocêntrico.
- ✓ Identificar e caracterizar os principais instrumentos de observação astronômica.
- ✓ Caracterizar trajetórias de corpos celestes do ponto de vista de diferentes referenciais.

6.1.4. CONTEÚDOS

Os conteúdos do programa abordados na aula são:

- ✓ Trajetória e referencial no Sistema Solar.
- ✓ Modelos astronômicos.
- ✓ Instrumentos ópticos (luneta).

6.1.5. ESTRATÉGIAS

6.1.5.1 MOTIVAÇÃO (5 min.)

Um bate papo inicial liga a aula ao corpo dos movimentos celestes em geral. Depois, é enumerada uma série de aspectos situações, corriqueiras em nossa sociedade, nas quais as observações astronômicas e os instrumentos ópticos desempenham um papel central. Tais como a medição do tempo (dia, ano, estações do ano); a previsão de eclipses; o descobrimento de novos planetas; fases da Lua; previsões de passagem de cometas, asteróides e outros corpos na vizinhança da Terra.

Deixar claro que, após o estudo detalhado e completo do conteúdo da aula, todos esses pontos poderão ser entendidos sem maiores dificuldades.

6.1.5.2. INTRODUÇÃO HISTÓRICA (10 min.).

É feita uma demonstração prática dos modelos geocêntrico e heliocêntrico, com alunos voluntários, dando início a uma introdução histórica da evolução dos modelos astronômicos, dos instrumentos de observação e das tentativas de chegar-se a um “modelo verdadeiro” para a estrutura do sistema solar.

6.1.5.3. DESENVOLVIMENTO (10 min.).

Os modelos geocêntrico e heliocêntrico, assim como os principais instrumentos de observação astronômica são, enfim, apresentados formalmente. Descreve-se luneta e telescópio. Caracteriza-se os modelos astronômicos e discute-se suas diferenças e implicações científico-religiosas.

6.1.5.4. APLICAÇÃO (15 min.).

Projeta-se um modelo ptolomaico e um copernicano do sistema solar no quadro para que todos possam acompanhar as principais diferenças. Projeta-se, também, uma luneta astronômica para que os alunos possam acompanhar a construção de imagens neste instrumento. Chamar a atenção tanto para a “simplicidade” das propostas de Ptolomeu & Copérnico quanto para a importância das pesquisas astronômicas no que se refere ao desenvolvimento da óptica geométrica.

6.1.5.5. CONCLUSÃO (5 min.).

Discussão sobre como seria possível tabelar as posições dos astros no decorrer dos anos, e que uma vez feito isto podemos descrever suas trajetórias e propor possíveis estruturas para o sistema solar.

Distribuição de apostilas com a discussão dos conceitos abordados na aula. Chamar a atenção para o questionário no final da apostila, a serem discutidos ao início da aula subsequente.

6.1.5.6. “PREPARATIVOS” PARA A PRÓXIMA AULA (5 min.).

Lembrar o fato de que as propostas de Ptolomeu e de Copérnico para a estrutura do sistema solar eram, essencialmente, empíricas. Discutir o que é uma lei empírica e questionar se aqueles modelos estão distantes do que sabemos hoje em dia (preparando o terreno para a introdução posterior, do modelo atual).

Reserva-se um período para perguntas finais dos alunos.

6.1.6 AVALIAÇÃO

A avaliação será feita através da observação do envolvimento do aluno com a atividade de aplicação (subjéitiva) e da resolução, em casa, de exercícios contidos ao final do texto distribuído ao aluno, a serem discutidos na próxima aula (objéitiva).

6.1.7 MATERIAL NECESSÁRIO

- ✓ Laser pointer.
- ✓ Retroprojétor.
- ✓ Transparências.
- ✓ Caneta de retroprojétor.
- ✓ Fotocópia de textos para os alunos.

6.2: Aula 2

6.2.1 TEMA

O conteúdo está inserido no tema “Movimentos Planetários & Eclipses”.

6.2.2 PRESSUPOSTOS CONCEITUAIS NECESSÁRIOS

Supõe-se que o aluno traz conceitos bem fundamentados de referenciais inerciais, sistemas de referência e trajetória. Além de noções acerca de movimentos curvilíneos, o aluno deve estar familiarizado com princípios básicos de óptica geométrica, tais como raio luminoso, propagação retilínea da luz, reversibilidade, independência dos raios luminosos, sombra, penumbra e possuir noções sobre a lei de gravitação de Newton.

6.2.3. OBJETIVOS

Ao final da aula, o aluno deverá estar apto a:

- ✓ Caracterizar o sistema Sol-Terra-Lua.
- ✓ Caracterizar e distinguir rotação, translação e precessão.
- ✓ Identificar e caracterizar, do ponto de vista do sistema Sol-Terra-Lua, o dia e a noite nos referenciais Terra, Lua e Sol.
- ✓ Discriminar a trajetória da Lua, em relação à Terra e a trajetória da Terra, em relação ao Sol.
- ✓ Caracterizar e discriminar, do ponto de vista de diferentes referenciais, eclipses solares e lunares.

6.2.4. CONTEÚDOS

Os conteúdos do programa abordados na aula são:

- ✓ Sistema Sol-Terra-Lua.
- ✓ Rotação, translação e precessão.
- ✓ Trajetórias elípticas e planos de órbitas.
- ✓ Sucessão de dias e noites.
- ✓ Eclipses.

6.2.5. ESTRATÉGIAS

6.2.5.1 MOTIVAÇÃO (5 min.).

Um bate papo inicial liga a aula ao corpo do sistema Sol-Terra-Lua em geral. Depois, é enumerada uma série de fenômenos, alguns deles de grande importância em qualquer sociedade, nas quais o movimento do sistema Sol-Terra-Lua desempenha papel central. Entre estes temos a ocorrência de eclipses, a sucessão de dias e noites e as estações do ano.

Deve-se deixar claro que, após o estudo detalhado e completo do conteúdo da aula, todos esses pontos poderão ser entendidos sem maiores dificuldades.

6.2.5.2 INTRODUÇÃO HISTÓRICA / EXPERIMENTO (10 min.).

É feita uma demonstração prática com o modelo do sistema Sol-Terra-Lua, dando início a uma introdução histórica acerca dos mistérios que cercavam fenômenos, como os eclipses, na antiguidade. Esta parte da aula pode ser acompanhada de apresentação de transparências com, por exemplo, fotografias de eclipses.

6.2.5.3 DESENVOLVIMENTO (10 min.).

O sistema Sol-Terra-Lua, assim como os movimentos de rotação, translação e precessão; a sucessão dos dias e noites e os tipos de eclipses são, enfim, apresentados formalmente. Define-se eclipse, eclipse total e eclipse parcial, eclipse solar e eclipse lunar. Caracteriza-se os diferentes tipos de eclipses e discute-se suas possibilidades e/ou condições de ocorrência (A explicação detalhada de “como” é manuseado o sistema encontra-se no item 7.2 deste trabalho).

6.2.5.4 APLICAÇÃO (15 min.).

Projeta-se um modelo do sistema Sol-Terra-Lua, no quadro para que todos possam acompanhar o trabalho proposto. Propõe-se que os alunos pensem a respeito dos movimentos relativos, no sistema, e tentem imaginar a configuração do mesmo em cada uma das situações discutidas no desenvolvimento. E, além disso, tentem responder à pergunta: em relação ao Sol, quando estamos viajando com uma velocidade maior, de dia ou de noite?

6.2.5.5 CONCLUSÃO (5 min.).

Discussão sobre como seria possível estimar a velocidade da sombra da Lua, projetada na Terra, durante um eclipse solar e como usar este resultado para estimar a extensão desta sombra.

Deve ser feita a distribuição de apostilas com a discussão dos conceitos abordados na aula. Chamar a atenção para o questionário no final da apostila, a serem discutidos ao início da aula subsequente.

6.2.5.6 “PREPARATIVOS” PARA A PRÓXIMA AULA (5 min.).

Lembrar o fato de que os principais fenômenos observados da Terra, como eclipses; dias e noites; fases da Lua; entre outros, estão relacionados com a configuração do sistema Sol-Terra-Lua naquele instante da observação e com as características dos movimentos executados pelo sistema. Discutir a noção de ano (preparando o terreno para a introdução posterior, acerca de periodicidade). Depois deixar um tempo para perguntas finais dos alunos.

6.2.6. AVALIAÇÃO

A avaliação será feita através da observação do envolvimento do aluno com a atividade de aplicação (subjéitiva) e da resolução, em casa, de exercícios contidos ao final do texto distribuído ao aluno, a serem discutidos na próxima aula (objéitiva).

6.2.7. MATERIAL NECESSÁRIO

- ✓ Laser pointer.
- ✓ Retroprojétor.
- ✓ Transparências.
- ✓ Caneta de retroprojétor.
- ✓ Modelo do sistema Sol-Terra-Lua.
- ✓ Fotocópia de textos para os alunos.

6.3: Aula 3

6.3.1. TEMA

O conteúdo está inserido no tema “Movimentos Planetários & Eclipses”.

6.3.2. PRESSUPOSTOS CONCEITUAIS NECESSÁRIOS

Supõe-se que o aluno traz conceitos bem fundamentados de referenciais inerciais, sistemas de referência e trajetória. Além de noções acerca de movimentos curvilíneos, o aluno deve estar familiarizado com princípios básicos de óptica geométrica, tais como raio luminoso, propagação retilínea da luz, reversibilidade, independência dos raios luminosos, sombra, penumbra e possuir noções sobre a lei de gravitação de Newton e geometria plana elementar (ângulos e áreas).

6.3.3. OBJETIVOS

Ao final da aula, o aluno deverá estar apto a:

- ✓ Caracterizar a sucessão de fases da Lua.
- ✓ Caracterizar o efeito maré e sua relação com as fases da Lua.
- ✓ Identificar ângulos e áreas varridas por trajetórias de planetas.
- ✓ Discriminar período e raio médio de órbita.
- ✓ Entender o significado e manipular, algebricamente, as leis de Kepler.
- ✓ Elaborar metodologia experimental para determinar o raio médio da órbita de um planeta qualquer.

6.3.4. CONTEÚDOS

Os conteúdos do programa abordados na aula são:

- ✓ Sistema Solar.
- ✓ Período e raio médio de órbitas.
- ✓ Sucessão das fases da Lua & o efeito maré.
- ✓ As leis de Kepler.

6.3.5. ESTRATÉGIAS

6.3.5.1 MOTIVAÇÃO (5 min.).

Um bate papo inicial liga a aula ao corpo do efeito maré. Depois, é enumerada uma série de fenômenos, nos quais o efeito maré, as fases da Lua e a periodicidade dos movimentos celestes desempenham papel central. Entre estes temos a questão da própria periodicidade das fases da Lua e o fato de termos quatro mudanças de maré por dia.

Deixar claro que, após o estudo detalhado e completo do conteúdo da aula, todos esses pontos poderão ser entendidos sem maiores dificuldades.

6.3.5.2 INTRODUÇÃO HISTÓRICA (10 min.).

É feita uma demonstração prática com o modelo do sistema Sol-Terra-Lua, dando início a uma introdução histórica acerca dos mistérios que cercavam fenômenos, como as fases da Lua, na antiguidade. Esta parte da aula pode ser acompanhada de apresentação de transparências com, por exemplo, fotografias de diferentes fases da Lua e ilustrações do efeito maré.

6.3.5.3 DESENVOLVIMENTO (10 min.).

As fases da Lua, assim como o efeito maré e as três leis de Kepler são, enfim, apresentados formalmente. Define-se plano de órbita, área varrida, período, raio médio de órbita, leis dos períodos de Kepler, força diferencial e as fases da Lua. Caracteriza-se as diferentes fases da Lua e discute-se suas condições de ocorrência. Assim como as relações entre raios médios das órbitas e períodos de revolução dos planetas.

6.3.5.4 APLICAÇÃO (15 min.).

Projeta-se um modelo do sistema Sol-Terra-Lua, no quadro para que todos possam acompanhar o trabalho proposto. Propõe-se que os alunos pensem a respeito dos movimentos relativos, no sistema, e tentem imaginar a configuração, do mesmo, em cada uma das situações discutidas no desenvolvimento, com relação às fases da Lua e do efeito maré. E, além disso, estime o período de revolução de um planeta hipotético, em torno do Sol, sendo conhecido o raio médio de sua órbita.

6.3.5.5 CONCLUSÃO (5 min.).

Primeiramente deve-se discutir sobre como seria possível associar as leis de Kepler e a lei da gravitação de Newton, para fazermos uma estimativa grosseira a respeito da massa de um planeta qualquer, partindo do período e do raio médio da órbita deste ao redor do Sol.

Depois deve-se distribuir uma de apostilas com a discussão dos conceitos abordados na aula. Chamar a atenção para o questionário no final da apostila, a serem discutidos ao início da aula subsequente.

6.3.5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS (5 min.).

Deve-se lembrar o fato de que as fases da Lua e o efeito maré estão relacionados com a configuração do sistema Sol-Terra-Lua; as órbitas dos planetas não são exatamente circulares; o plano das órbitas não é o mesmo para todos os planetas. No entanto, cada planeta tem seu próprio plano de órbita. A seguir deve-se discutir o quão árduo foi o caminho histórico desde as primeiras observações até Kepler formular suas leis e a importância destas para a humanidade. Ao final, um tempo para perguntas finais dos alunos.

6.3.6. AVALIAÇÃO

A avaliação será feita através da observação do envolvimento do aluno com a atividade de aplicação (subjetiva) e da resolução, em casa, de exercícios contidos ao final do texto distribuído ao aluno, a serem discutidos na próxima aula (objetiva).

6.3.7. MATERIAL NECESSÁRIO

- ✓ Laser pointer.
- ✓ Retroprojeter.
- ✓ Transparências.
- ✓ Caneta de retroprojeter.
- ✓ Modelo do sistema Sol-Terra-Lua.
- ✓ Fotocópia de textos para os alunos.

7. QUESTIONÁRIO DIDÁTICO

Ao final das aulas o professor poderá avaliar a eficácia do método, a partir das respostas dos alunos a um novo questionário. Após as respostas dos alunos, é recomendável que o professor, caso necessário, discuta cada questão fazendo uso do modelo experimental.

7.1: Perguntas

- 1º) Como se sucedem os dias e noites?
- 2º) Por que sempre vemos a mesma face da Lua?
- 3º) Por que vemos o Sol “andar” do Leste para o Oeste?
- 4º) Quando viajamos mais rápido no espaço, de dia ou de noite?
- 5º) O que são os Eclipses?
- 6º) Como os Eclipses ocorrem?
- 7º) Qual é a diferença entre Eclipse Solar e Eclipse Lunar?
- 8º) Por que os Eclipses Solares só duram alguns poucos minutos?
- 9º) Por que o Eclipse Lunar só ocorre à noite e o Solar durante o dia?
- 10º) Qual é a diferença entre Eclipse total e Eclipse parcial?
- 11º) Se o a Lua dá uma volta completa em torno da Terra a cada 28 dias, aproximadamente, por que não há Eclipses a cada 28 dias?
- 12º) Quando temos maré alta? E quando temos maré baixa?

7.2: Respostas

Aqui iremos tratar, em linhas gerais, de algumas manipulações que o professor poderá efetuar no equipamento, com o intuito de responder às perguntas acima.

1º) Podemos responder a esta questão, simplesmente simulando o movimento de rotação da Terra, explicando que, quando estamos na região iluminada pelo Sol, dizemos ser dia e, quando estamos no outro lado da Terra, é noite;

2º) Agora iremos simular o movimento de translação da Lua em torno da Terra. Manuseando Lua e Terra de tal modo que a Lua não efetue rotação em torno de um próprio eixo, pode-se mostrar que, para um observador na Terra, a Lua não gira. Mostrando, assim, sempre a mesma face;

3º) Pondo a Terra para efetuar seu movimento de translação em torno do Sol, podemos explicar essa particularidade facilmente;

4º) Simulando, ao mesmo tempo, rotação e translação da Terra em torno do Sol. Pode-se mostrar que a velocidade de pontos, onde é dia na Terra (pontos “de frente para o Sol”), é a diferença entre a velocidade de translação e de rotação da Terra. Enquanto que, em pontos, onde é noite na Terra, essa velocidade é a soma das velocidades de rotação e translação da Terra. Assim, a velocidade de um observador na Terra, em relação ao espaço, é maior durante a noite;

5º) O professor pode efetuar os mesmos movimentos feitos acima e chamar a atenção dos alunos para as situações onde há projeção de sombras de um corpo sobre outro, definindo, assim, os eclipses;

6º) Esta resposta está embutida no descrito acima;

7º) Ainda efetuando os movimentos citados no item 4, o professor deve chamar a atenção que aquelas sombras aparecem em duas situações: quando a Terra está entre o Sol e a Lua (sombra da Terra projetada sobre a Lua), definindo o Eclipse Lunar e quando a Lua está entre o Sol e a Terra (sombra da Lua projetada sobre a Terra), definindo o Eclipse Solar;

8º) O professor pode mostrar, ainda, que essas sombras não são estáticas. E, caso convir, fazer um tratamento quantitativo, estimando a velocidade da sombra;

9º) Esta resposta está embutida no item 7;

10º) A diferenciação entre essas duas formas é de difícil visualização com o equipamento. Sendo assim, o professor pode fazer um tratamento à parte e mostrar, no modelo, as regiões onde seriam vistos os eclipses totais e parciais;


11º) Agora o professor deverá se preocupar com o controle sobre o plano da órbita da Lua em nosso modelo. Nele, a órbita da Lua já está fora do plano de jazitura horizontal que contém Terra e Sol. E o professor tem a oportunidade de explicar o porquê deste desvio;

12º) Simulando o movimento de translação da Lua em torno da Terra, exemplificamos essas situações de maneira análoga àquelas explicadas no item 1. Em pontos próximos ao eixo determinado pela Terra e pela Lua, a maré é alta, em virtude da atração gravitacional da Lua e da chamada força diferencial.

8. CONCLUSÃO

Neste momento atinjo a satisfação de ter, finalmente, concluído o objetivo primeiro deste trabalho: Propor uma metodologia e fornecer um material capaz de auxiliar tanto aos professores (no ensino) quanto aos alunos (no aprendizado) no que diz respeito ao conteúdo "Gravitação Universal". Apesar de este assunto ser muito pouco explorado na maioria das escolas do Brasil, tive a nítida sensação de que não era totalmente ignorado pelos alunos, mesmo quando os mesmos jamais haviam tido aulas acerca do conteúdo: isto pode ser evidenciado à partir da grande quantidade de subsunçores obtidas quando da aplicação do questionário inicial.

Claramente, a utilização deste material não prioriza, nem poderia priorizar!- o desenvolvimento acentuado, por parte dos alunos do ensino médio, da habilidade na manipulação algébrica das leis da gravitação, pois é do conhecimento e aceitação de todos os grandes educadores que assuntos desta natureza merecem um tratamento especial. Porém, com certeza, terá grande influência no despertar do interesse dos alunos pela ciência e pode fazer com que muitos deles deixem de ver a Física como uma simples disciplina escolar, totalmente desprovida de vínculos sociais e sem "histórias para contar". Mesmo que poucas escolas trabalhem esse assunto, é melhor utilizar esta metodologia "menos tradicional" do que assustar ainda mais os meninos.

Primer
relacionados?
Durante a elaboração desta monografia surgiram interesses em desenvolver trabalhos relacionados^à, pelo menos, dois tópicos semelhantes. O primeiro poderia levar o título "Como se forma um Sistema Solar?" e ter caráter para-didático voltado ^à alunos do Ensino Médio; o segundo, por envolver cálculos complicados e estar mais inclinado no sentido topográfico dos sistemas solares teve sua possibilidade de figurar ^{nessa?} como monografia descartada. Todavia, tem grandes chances de vir a ser desenvolvido, de maneira independente, num futuro próximo. 

Qual?
Acreditando fielmente na eficácia da aplicação deste trabalho, finalizo desejando sucesso aos professores e alunos; espero ter contribuído, ao menos discretamente, a esta nobre arte do magistério.

? *?* *?* *?* *?*

20

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] AUSUBEL, David P. **The Psychology of meaningful verbal learning**. New York: Grune and Stratlon. 685p.
- [2] AUSUBEL, David. **The acquisition and retention of knowledge: a cognitive view**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 212p.
Em www.davidausubel.org/ "The acquisition and retention of knowledge".
Acessado em 20/08/2007.
- [3] AUSUBEL, David P., NOVAK, Joseph D. & HANESIAN, Helen. **Psicologia Educacional**. Rio de Janeiro: Interamericana. Tradução para o português do original *Educational Psychology: a cognitive view*. 1980. 625p.
- [4] MEC, **Parâmetros curriculares para o ensino médio**. Brasil, parte III, 1999;
- [5] SALVADOR, C.C; COLS. **Psicologia do ensino**. A Teoria da aprendizagem verbal significativa, p.231-240;
- [6] DIAS, P.M.C.; DE SOUZA, M.T.M.; SANTOS, W.M.S. A Gravitação Universal (Um texto para o ensino médio). **Revista Brasileira de ensino de Física**, www.sbfisica.org.br, vol. 26, n. 3, p.257-271, 2004;
- [7] NUSSENZVEIG, H.M. **Curso de Física Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, v. 1, 1988. 519 p. il.
- [8] BERNAL, J. **Science in History**. Vol. 4. Middlesex: Penguin Books. 1969;
- [9] ROCHA, J.F et al. **Origens e Evolução das idéias da Física**. 1. ed. Salvador: EDUFBA, 2002. 372P.
- [10] HOLD, RINEHART and WINSTON, Inc. Text and Handbook. Unit 2: **Motion in The Heavens**. 3rd edition. Toronto, New York: Project Physics Course, 1972.2000p;
- [11] KEPLER – A harmonia dos astros. **Scientific American**, Brasil, p. 3 – 98, 2005;
- [12] DE MEIS, L; RANGEL, Diucênio. **O método científico**. 2. ed. Rio de Janeiro: ed. do autor, 2000. 84p;
- [13] JEFFREY, K. Wagner. **Introduction to the Solar System**. U.S.A: Saunders college publishing, 1991. 453p.
- [14] CHARISSON, E.; McMILLAN, Steve. **Astronomy Today**. 2.ed. U.S.A: Prentice-Hall, 1993. 658p.;
- [15] GALILEU - Universo em movimento. **Scientific American**, Brasil, p. 3 – 98, 2005;
- [16] NEWTON, I. **Principia**. Berkeley: University of California Press, 1960;

[17] LOPES DE MATOS, Carlos. Os pensadores. Vol. XIX. São Paulo: Abril Cultural, 1974;

[18] CURIOSIDADES SOBRE OS ECLIPSES. Disponível em:
<<http://www.fenomeno.matrix.com.br>>. Acesso em: 19 nov. 2006.