



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

**A 'Natureza da Ciência' através do exemplo
do desenvolvimento das ideias que
levaram à Gravitação Universal**

(caderno do professor)

Marcelo Franco de São Tiago

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Marcelo Franco de São Tiago, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
2011

Caderno do Professor

A 'NATUREZA DA CIÊNCIA' ATRAVÉS DO EXEMPLO DO DESENVOLVIMENTO DAS IDEIAS QUE LEVARAM À GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Marcelo Franco de São Tiago

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadores:

Fernando de Souza Barros
Susana Lehrer de Souza Barros

Rio de Janeiro
Abril de 2011

Não nos perguntamos qual o propósito útil dos pássaros cantarem, pois o canto é o seu prazer, uma vez que foram criados para cantar. Similarmente, não devemos perguntar por que a mente humana se inquieta com a extensão dos segredos dos céus... A diversidade dos fenômenos da Natureza é tão vasta e os tesouros escondidos nos céus tão ricos, precisamente para que a mente humana nunca tenha falta de alimento.

Johannes Kepler

Caro Professor,

O material que se apresenta agora é fruto da minha insatisfação com o ensino de Física como ele frequentemente ocorre. Portanto, se você também estiver insatisfeito, este material poderá lhe interessar.

A motivação para escrevê-lo veio da percepção que os alunos, mesmo aqueles mais interessados e que aprendem o que ensinamos, após três anos de muitas aulas de Física, Química e Biologia, apresentam uma visão equivocada da atividade humana que chamamos ciência.

O aluno pode falar sobre os *modelos* geocêntrico e heliocêntrico, enunciar as *Leis* de Kepler, apresentar algumas idéias sobre a *Teoria* de Gravitação Universal de Newton e mesmo saber escrever corretamente as expressões matemáticas correspondentes. Apesar disto, não sabe o que seja um *modelo*, uma *lei* ou uma *teoria*. Muitas vezes acha que com provas suficientes, uma teoria pode acabar virando uma lei.

Difícilmente será encontrado um aluno no Ensino Médio que não saiba expressar corretamente que a Terra gira em torno de seu eixo e revoluciona em torno do Sol. Porém, será difícil encontrar um que apresente razões para acreditar nisso e que consiga justificar suas afirmativas. Ainda mais difícil será que consigam reconhecer modelos históricos que explicavam o movimento da Terra há mais de dois mil anos atrás, compreender as críticas que levaram ao abandono desses modelos, enfim, reconhecer os avanços, mas, ao mesmo tempo, as limitações das contribuições dadas por Copérnico, Galileu, Brahe, Kepler e Newton.

Certamente, isto não é culpa do aluno. Frequentemente o sistema de ensino é dogmático e mecanizado, baseado na repetição, treinamento e memória e oferece pouco estímulo ao pensamento autônomo e crítico. Na disciplina de Física costuma ser suficiente conhecer um amplo leque dos algoritmos que representam as relações entre as grandezas físicas para resolver problemas. Nesse cenário como esperar que o aluno aprecie a beleza que o conhecimento da Física poderia lhe trazer?

Qualquer professor que pretenda contribuir para transformar a realidade atual do ensino de física terá que preocupar-se com a 'natureza da ciência' no seu trabalho cotidiano. Quer dizer, não basta melhorar a forma como se ensinam os conteúdos da ciência (neste caso, da Física), é preciso ensinar sobre a ciência, mostrá-la como uma atividade humana, uma ferramenta ao mesmo tempo poderosa, mas com limites. Como

dizia Platão, *mostrar as razões pelas quais se deve acreditar na ciência*. Ajudá-lo nesta empreitada é o principal objetivo deste material.

APRESENTAÇÃO

Para o professor do ensino médio que acredite ser importante trabalhar aspectos da ‘natureza da ciência’ quando ensina Física, o acesso a materiais que lhe permitam introduzir elementos de ‘natureza da ciência’ (NdC) pode reforçar o ensino em sala de aula. É importante ressaltar dois aspectos que explicam o porquê dessa situação: os textos didáticos tratam pouco desse assunto de forma explícita, e os professores frequentemente têm um déficit oriundo de sua formação inicial. Somente aqueles que por interesse motivaram-se para leituras e estudos autodidatas sentem-se preparados para enfrentar esse desafio.

Os seis textos históricos apresentados para o professor constituem uma seqüência alinhavada de forma sintética das principais idéias da ciência, que levaram a estabelecer a teoria da Gravitação Universal, dos povos antigos até Newton, que foram desenvolvidas ao longo de 2000 anos. Esses textos têm o objetivo de mostrar de forma muito sucinta as idas e voltas de como se deu o desenvolvimento da ciência, as propostas, as formas de trabalho dos cientistas que as elaboraram, os modelos e exemplos dos elementos que a ciência usa para construir-se e que por tanto a caracterizam de forma singular. Newton juntou esse conhecimento para chegar à grande síntese teórica da Gravitação Universal. Essa análise pode ser usada como exemplo para identificação e reflexão dos elementos essenciais da NdC, que levam a entender os processos cognitivos e avaliativos da ciência, tais como criatividade, dados empíricos, teoria, desenvolvimento de modelos coerentes que podem ser verificados. A evolução das teorias, seus objetivos e limitações auxiliam na compreensão da importância de uma aprendizagem de ciência que não se limite aos conteúdos ‘nus’. Essa aprendizagem pode acontecer de forma mais eficiente e duradoura quando alinhavada através de elementos da NdC, o que levará o aluno a reconhecer o significado do que aprende.

As questões e atividades propostas no final de cada um dos seis textos históricos surgem apenas como uma sugestão de aplicação dos mesmos e têm a intenção de dar algumas idéias para o professor utilizá-los em sala de aula com seus alunos. Cada um dos textos identifica, inicialmente, os elementos da NdC que podem ser trabalhados e que fazem parte da lista apresentada no item 1.3 deste Caderno. Cada um desses

elementos de NdC está associado a um número, que indica sua posição na referida lista. Estes números aparecem em pequenas caixas, na margem lateral do texto. O propósito disto é facilitar a identificação das partes do texto que apresentam com maior clareza determinadas características da atividade científica. As questões de compreensão relacionadas com os textos e os projetos sugeridos para os alunos constituem atividades que eles poderão realizar em grupo ou individualmente. O foco dessas atividades é a busca por *evidências* dos elementos que têm caracterizado a ciência, desde sua gênese até o século XVIII, a partir do caso da Gravitação, isto é, evidências das formas pelas quais cientistas como Galileu e Newton trabalharam e influenciaram decisivamente o conhecimento desenvolvido posteriormente.

Os textos históricos têm o objetivo de apresentar algumas idéias acerca de nossa compreensão do Universo, desde os modelos dos Gregos até a obra de Newton. A intenção é utilizar o desenvolvimento histórico das idéias que levaram à Teoria de Newton da Gravitação Universal para explicitar características da ciência. Pode-se mesmo dizer que o fruto mais importante desse esforço de compreensão do comportamento do Universo não foi a teoria particular, mas sim a forma de desenvolver esse conhecimento. Com a síntese Newtoniana a ciência, nascida na Grécia, atinge a maturidade.

Sumário

1. A ‘NATUREZA DA CIÊNCIA’ E O ENSINO DE FÍSICA	7
1.1. O que significa ‘Natureza da Ciência’	7
1.2. Porque ensinar ‘Natureza da Ciência’	8
1.3. O que ensinar sobre a ‘Natureza da Ciência’	9
1.3.1. Idéias de NdC comumente encontradas.....	9
1.3.2. Elementos de NdC: uma proposta para o ensino médio.....	12
1.4. Ensino de Física, História da Ciência e ‘Natureza da Ciência’	16
1.5. A Gravitação Universal	18
2. TEXTOS HISTÓRICOS SOBRE A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL	20
Texto 1 – Um novo olhar para o céu: o surgimento da ciência.....	20
Texto 2 – A Terra se move? O céu dos Gregos.....	23
Texto 3 – A obra de Copérnico: deslocando a Terra do centro do Universo	28
Texto 4 – Observação e Teoria. As contribuições de Brahe e Kepler.....	31
Texto 5– Galileu: para uma Física da Terra em Movimento.....	36
Texto 6 – Unindo Céu e Terra. A síntese de Newton.....	41
UMA REFLEXÃO SOBRE A CIÊNCIA E SUA NATUREZA NA SALA DE AULA	45
BIBLIOGRAFIA	46

1. A 'NATUREZA DA CIÊNCIA' E O ENSINO DE FÍSICA

1.1. O QUE SIGNIFICA 'NATUREZA DA CIÊNCIA'

Assim como a ciência é uma representação da Natureza, a 'Natureza da Ciência' (NdC) é uma representação da ciência.

A Física propõe respostas para perguntas feitas sobre fatos, processos e objetos do mundo material, por exemplo: Como se movem os astros? O que é a luz e como ela se propaga? Do que são feitas todas as coisas? Como surgiu o universo? Qual é a constituição da matéria?

A NdC propõe respostas para perguntas sobre a ciência: Como se dá o desenvolvimento do conhecimento científico? O que diferencia a ciência de outras atividades humanas? O que é um fenômeno, um fato, uma hipótese, uma lei, um modelo, uma teoria? A ciência exige criatividade? Como a ciência se relaciona com a sociedade e a cultura, de forma mais ampla? Como se testam idéias em ciência?

As respostas dadas a essas e muitas outras perguntas compõem a visão atual de ciência, de "Natureza da Ciência". É preciso reconhecer que há muita controvérsia entre os especialistas e que nem todos enxergam as características da ciência do mesmo modo. Contudo, sobre algumas questões mais básicas (que podem ser compreendidas e interessar alunos do ensino médio), há suficiente acordo para que se possa formar uma imagem de NdC.

Deste modo, pode-se dizer que:

Para os educadores da ciência a expressão 'a natureza da ciência', é usada para descrever a interseção de questões abordadas pela filosofia, história, sociologia e psicologia da ciência como elas se aplicam e potencialmente impactam o ensino e a aprendizagem da ciência. Como tal, a natureza da ciência é um domínio fundamental para orientar os educadores em ciência na acurada representação da ciência aos estudantes. [McComas, Clough & Almazroa 1998, p. 5]

Isto não quer dizer que o professor de Física deva se tornar filósofo, sociólogo, psicólogo ou historiador da ciência. Ele deverá ser informado pelos especialistas das referidas área para construir uma imagem de ciência compreensível para os jovens estudantes.

1.2. PORQUE ENSINAR 'NATUREZA DA CIÊNCIA'

Como Platão insistiu, longo tempo atrás, educação não é apenas a posse de crenças corretas, é a posse de razões adequadas para estas crenças.

Michael Matthews

Para uma compreensão das razões para se crer, como queria Platão, é preciso ir além da ciência. Como dito antes, a ciência é um olhar sobre a natureza e não sobre si própria. Portanto, só com as contribuições das disciplinas que têm como objeto a ciência pode-se chegar a compreender sua gênese e desenvolvimento.

Pesquisadores ligados ao ensino de ciências vêm advogando a inclusão da NdC nos currículos científicos há muitas décadas. Em consequência disto, currículos de ciências de um número cada vez maior de países têm incluído elementos da NdC em seus textos.

Dentre as justificativas apresentadas nesses documentos para essa inclusão, podem-se citar as seguintes: (a) proporcionar uma compreensão sobre as maneiras pelas quais o conhecimento confiável do mundo natural tem sido e está sendo obtido; (b) compreendendo como se produz o conhecimento, as pessoas deixarão de rejeitá-lo ou aceitá-lo acriticamente; (c) apreciar o valor da ciência como parte da cultura contemporânea; (d) os alunos devem compreender a ciência como um poderoso esforço humano. Recentemente, um grupo brasileiro de professores de Física escreveu, num documento de orientação curricular para o estado do Rio de Janeiro, o texto que destacamos a seguir:

Tão importante quanto conhecer os princípios fundamentais da Física é saber *como chegamos a eles, e porque acreditamos neles*. Não basta ter conhecimento científico sobre a natureza; também é necessário entender *como a ciência funciona*, pois só assim as *características e limites* deste saber podem ser avaliados. O estudo da Física coloca os alunos da escola média frente a situações concretas que podem ajudá-los a compreender a ***natureza da ciência*** e do conhecimento científico. Em particular, eles têm a oportunidade de verificar como é fundamental para a aceitação de uma *teoria científica* que esta seja consistente com *evidências experimentais*. Isso lhes permitirá distinguir melhor entre ciência e pseudociência, e fazer sua própria avaliação sobre temas como astrologia e criacionismo. Eles poderão também reconhecer as limitações inerentes a investigação científica, percebendo que existem questões fundamentais que não são colocadas nem respondidas pela Ciência. [Aguiar, Gama e Costa 2006 – grifos do autor]

O que o ensino de Física poderia oferecer de melhor para o imenso grupo de alunos que não seguirá a carreira científica do que o exposto no parágrafo acima?

1.3. O QUE ENSINAR SOBRE A 'NATUREZA DA CIÊNCIA'

Compreendemos hoje, com especial clareza, o quanto estão equivocados os teóricos que acreditam que a teoria provém da experiência, por indução. Nem o grande Newton conseguiu escapar desse erro (“*Hypotheses non fingo*”).

Albert Einstein

Ainda bem que é o Einstein que está dizendo! Mas, brincadeiras à parte, a epígrafe está aí para lembrar que todos erram¹. O erro é parte do processo de construção do conhecimento, o que não quer dizer que não se deva corrigi-los quando identificados. Deste modo, é muito comum que alunos, professores e livros didáticos apresentem certas visões mitificadas da ciência. A seguir serão identificados alguns desses mitos, bem como a visão de NdC considerada informada. Antes, porém, é preciso fazer uma ressalva:

Ninguém aprende física só porque recebeu uma folha cheia de fórmulas. Do mesmo modo, a leitura deste material serve, no máximo, para indicar aquilo que deve ser estudado e aprofundado através de fontes mais qualificadas². O objetivo deste trabalho é muito mais fazer refletir e estimular do que informar.

1.3.1 – Idéias de NdC comumente encontradas

Relacionam-se, abaixo, algumas das idéias consideradas equivocadas por pesquisadores das áreas de ensino de ciências, história e filosofia da ciência, mas que ainda são comumente encontradas entre alunos, professores e nos livros didáticos de ciências.

1. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO É CONSIDERADO COMO CERTO, VERDADEIRO E ABSOLUTO.

Esta visão se baseia na crença de que testes empíricos podem provar de forma absoluta e definitiva uma afirmação científica. O acordo entre dados de observação e hipóteses, modelos e teorias são evidências que se acumulam em favor dos mesmos,

¹ Na realidade, a discussão sobre o sentido da frase de Newton, como ele entendia e fazia ciência é mais complexa e deveria levar em conta o resto de sua obra e o contexto científico da época, como as idéias de Descartes, etc.

² Uma sugestão de fontes deste tipo é dada nas referências bibliográficas.

mas não chegam a constituir-se em prova definitiva. A história de ciência mostra vários desses casos em que teorias têm passado por testes experimentais para serem, mais tarde, abandonadas como incorretas. Outras se encontram em desacordo com algum experimento e, assim mesmo, não são descartadas. O conhecimento tem caráter provisório no sentido de ser auto-corretivo.

2. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO EMERGE AUTOMATICAMENTE DA APLICAÇÃO DE UM MÉTODO CIENTÍFICO ALGORÍTMICO, ÚNICO E UNIVERSAL.

Além de não haver um método único que se aplique a todas as ciências, os diversos métodos existentes não são garantia da obtenção de conhecimento. Nenhum conjunto de passos seguidos rigorosamente pode levar à construção de uma teoria, por exemplo. Apesar de se construir apoiado em fatos, o conhecimento científico não é um acúmulo de fatos do mesmo modo que um monte de tijolos não é uma casa.

3. A CRIATIVIDADE NÃO É RECONHECIDA COMO UMA CARACTERÍSTICA ESSENCIAL DA PESQUISA CIENTÍFICA.

A ciência tem como meta proporcionar explicações generalizáveis. Estas explicações são as teorias e os modelos. Nenhum conjunto de fatos é suficiente para, por si só, dar origem às teorias e modelos. Só a criatividade humana é capaz de engendrar tais explicações, isto é, não há um caminho lógico que leve dos dados às explicações, estas têm que ser inventadas.

4. COMPREENSÃO EQUIVOCADA DA RELAÇÃO ENTRE LEIS E TEORIAS CIENTÍFICAS.

As pesquisas em ensino de ciências têm mostrado que é comum pensar-se que com mais evidências favoráveis, uma teoria pode vir a tornar-se uma lei. Contudo, não há esta relação hierárquica entre elas. Leis e teorias exercem funções distintas na pesquisa científica. Leis são generalizações, princípios ou padrões na natureza, estabelecem relações, geralmente quantitativas, entre parâmetros mensuráveis ou características do sistema em estudo. São exemplos as leis de Kepler, as leis de Newton, a lei de Hooke, a lei de Boyle, as leis da termodinâmica, as leis de Maxwell, etc. Já as teorias procuram fornecer as explicações para tais padrões ou regularidades. Um exemplo claro é a relação entre as leis de Boyle, Charles e Gay-Lussac, que estabelecem padrões para o comportamento de um gás e a teoria cinética dos gases, que justifica tal comportamento.

5. MODELOS CIENTÍFICOS SÃO CÓPIAS DA REALIDADE.

A discussão deste ponto está associada à questão filosófica entre realismo (os produtos da ciência não apenas funcionam e permitem previsões, mas realmente representam e/ou descrevem a realidade) e instrumentalismo (as idéias estão de acordo com as observações e são úteis para fazer previsões, mas não pretendem descrever a realidade como ela é). Entre os filósofos a questão é muito sofisticada, mas alguns exemplos da história da ciência podem ajudar o professor a levar essa questão de forma mais simples para o ensino médio. Dois exemplos da história da gravitação são as esferas cristalinas (reais para uns e apenas um modelo para as contas para outros) e o prefácio de Osiander para o livro de Copérnico, propondo que o modelo heliocêntrico seria apenas um recurso para facilitar os cálculos das órbitas dos planetas e não uma descrição da realidade. Uma imagem interessante para discutir isto é fornecida por Einstein e Infeld no livro *A Evolução da Física*³. Eles comparam a natureza a um relógio que não pode ser aberto. A ciência é o relógio que construímos e que deve se comportar como o primeiro. Mesmo quando conseguimos fazer com que nosso relógio reproduza todos os movimentos do primeiro, não podemos afirmar que seus mecanismos internos sejam idênticos.

6. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO CRESCE E SE ACUMULA DE FORMA LINEAR.

O modo como o conhecimento científico costuma ser apresentado nos livros didáticos e nas aulas de ciências promove a visão de que os cientistas se alinham na construção de uma visão coerente e única da ciência, cada um avançando de onde o anterior parou. As crises, controvérsias, idas e voltas da pesquisa científica são desconsideradas. O estudo das idéias que levaram à gravitação também fornece elementos para a transformação desta visão. O revolucionário Copérnico propõe um modelo que já havia sido proposto na Grécia antiga, e tinha por objetivo resgatar as esferas perfeitas do modelo aristotélico. Kepler defende o heliocentrismo copernicano, mas propõe as órbitas elípticas (uma verdadeira ruptura com as esferas milenares) e sugere partituras para as melodias entoadas pelos astros. Galileu, o mais eficiente defensor do modelo heliocêntrico, não se pronunciou quanto às órbitas elípticas e parece mesmo que continuou aceitando o círculo. Newton usou muito dos resultados de ambos, mas transformou a inércia de Galileu de circular para retilínea e dos muitos escritos e proposições de Kepler ficou apenas com suas leis de movimento planetário. Como se

³ [Einstein & Infeld 1988]

pode observar, o crescimento do conhecimento científico se dá de forma muito mais complexa do que a propagada linearidade.

1.3.2 – Principais elementos de NdC

Apesar de toda controvérsia em torno da possibilidade de se oferecer um quadro geral que caracterize a ciência, algumas idéias básicas estão muito bem estabelecidas. Não se pode perder de vista, que o objetivo não é apenas compor uma imagem informada da ciência, mas também definir quanto dessa imagem pode ser apresentada aos alunos do ensino médio. Para a elaboração deste “Caderno do Professor” foram utilizadas pesquisas empreendidas no âmbito da educação em ciências. Isto é, os pesquisadores conduziram seus trabalhos com o objetivo de informar a comunidade de ensino de ciências e, portanto, todos já buscavam um consenso dentro do que seria razoável trabalhar no ensino médio. Deste modo, os elementos da NdC apresentados aqui já cumprem os dois critérios seguintes: (a) são consensuais entre os especialistas e (b) estão num nível de complexidade adequado para serem discutidos com alunos do ensino médio.

LISTA DE ELEMENTOS DA NdC QUE SERÃO TRABALHADOS⁴

1. A CIÊNCIA DEPENDE DE EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS.
2. A DISTINÇÃO ENTRE OBSERVAÇÃO E INFERÊNCIA.
3. LEIS E TEORIAS EXERCEM FUNÇÕES DIFERENTES NA CIÊNCIA.
4. A CIÊNCIA COMO BUSCA DE EXPLICAÇÕES.
5. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO É PARCIMONIOSO
6. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO TEM UM CARÁTER PROVISÓRIO
7. O CARÁTER SOCIAL DA CIÊNCIA
8. A CIÊNCIA TEM UM COMPONENTE SUBJETIVO (IMPREGNADO DE TEORIA)
9. A CRIATIVIDADE É UMA CARACTERÍSTICA ESSENCIAL DA CIÊNCIA
10. CIÊNCIA E TECNOLOGIA NÃO SÃO A MESMA COISA, MAS IMPACTAM UMA SOBRE A OUTRA

⁴ Esta lista é apenas uma sugestão de trabalho. Há muitos outros elementos da NdC que poderiam ser discutidos no ensino médio, como sugerem as pesquisas na área. Aqui, faz-se uma seleção, com o intuito de exemplificar como esses elementos podem ser trabalhados de forma integrada num programa de Física.

Para que elementos da NdC possam ser trabalhados em aulas de Física eles devem estar integrados com o seu conteúdo. É preciso, pois, identificar os conteúdos do programa de Física mais apropriados para explicitar essa ou aquela idéia da NdC. A unidade curricular escolhida para este exercício é a Gravitação Universal. O que se seguirá é uma tentativa de acomodar, sob as idéias básicas da NdC, aqueles aspectos do conteúdo de Física junto do qual elas poderão ser apresentadas e discutidas.

1. A CIÊNCIA DEPENDE DE EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS.

Um exemplo extraordinário é o papel desempenhado pelos dados de Tycho Brahe para o estabelecimento de uma cinemática dos corpos celestes por Johannes Kepler. Mas mesmo antes disso, já se encontram modelos cosmogônicos comprometidos com os dados de observação acumulado ao longo dos tempos.

2. A DISTINÇÃO ENTRE OBSERVAÇÃO E INFERÊNCIA.

Quando Penzias e Wilson observaram um sinal de microondas vindo de todos os pontos do universo acharam que era apenas um ruído. Quando os cosmólogos souberam dessa observação inferiram que se tratava de radiação associada ao Big Bang. Esta ligação entre o sinal de microondas detectado e o Big Bang não está no que é observado, tem que ser inferida.

3. LEIS E TEORIAS EXERCEM FUNÇÕES DIFERENTES NA CIÊNCIA.

As leis dos gases estabelecem relações matemáticas entre parâmetros mensuráveis como pressão volume e temperatura. A teoria cinética dos gases fornece uma explicação para estas relações. Portanto, leis e teorias desempenham funções diferentes no âmbito da ciência e uma não se transforma na outra. Outro exemplo são as Leis de Kepler que estabelecem padrões para os movimentos dos astros e a teoria de gravitação universal que, a partir da existência de uma força atrativa entre corpos com massa e da forma desta atração explica os resultados obtidos por Kepler.

4. A CIÊNCIA COMO BUSCA DE EXPLICAÇÕES.

O que distingue a forma como os gregos e os outros povos da antiguidade se relacionaram com os dados de observação do céu foi a busca de explicação por parte dos primeiros. Os outros povos reconheceram uma ordem nos movimentos e até conseguiram fazer previsões, mas não construíram modelos que explicassem os diferentes movimentos a partir de alguns princípios básicos, como os círculos dos gregos.

5. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO É PARCIMONIOSO

A teoria de gravitação de Newton, juntamente com suas três leis de movimento, conseguiu explicar todos os fenômenos antes relacionados com as leis de Kepler e a mecânica de Galileu. De fato, a mecânica de Newton explicou outros fenômenos não explicados antes. Este poder de explicar um número maior de fenômenos com um menor número de princípios constitui-se num ideal da ciência.

6. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO TEM UM CARÁTER PROVISÓRIO

Tomando como exemplo as tentativas de explicar os movimentos dos astros, pode-se dizer que os modelos e teorias construídos vêm se alterando há 2400 anos, sendo que as últimas mudanças ocorreram há menos de 100 anos com Einstein e sua Teoria da Relatividade Geral.

7. O CARÁTER SOCIAL DA CIÊNCIA

Um exemplo interessante é o de Galileu e a Igreja. Outro exemplo mais sofisticado seria comparar a escola francesa (mais afeita à construção de teorias puramente matemáticas) e a escola inglesa (mais empírica e dada à construção de modelos mecânicos) no estudo dos fenômenos elétricos no século XIX.

8. A CIÊNCIA TEM UM COMPONENTE SUBJETIVO (IMPREGNADO DE TEORIA)

Mais uma vez, Kepler é um bom exemplo. Apesar de se dobrar à evidência das observações de Tycho Brahe que apontavam para a elipse, Kepler relutou muito em abandonar as esferas e os sólidos regulares de Platão, tão caros à sua imagem de

Universo. Outro exemplo é o de Einstein, segundo a visão de Pierre Thuillier em seu livro: *De Arquimedes a Einstein: a face oculta da investigação científica*.⁵

9. A CRIATIVIDADE É UMA CARACTERÍSTICA ESSENCIAL DA CIÊNCIA

Mesmo conhecendo as órbitas elípticas de Kepler e o método de Hooke para analisar o movimento orbital (método que por si só já exigiu o uso de criatividade) a teoria de Gravitação de Newton não pode ser simplesmente inferida destes dados. Sem o uso da imaginação e da criatividade, jamais surgiriam teorias.

10. CIÊNCIA E TECNOLOGIA NÃO SÃO A MESMA COISA, MAS IMPACTAM UMA SOBRE A OUTRA

A ciência é uma busca de descrição e explicação do mundo a nossa volta, nem sempre seus conhecimentos são transformados em aparatos úteis para a realização de alguma tarefa. Já a tecnologia se constitui na construção de tais instrumentos que facilitam ou tornam possíveis certas tarefas, mesmo que a compreensão de seu funcionamento não seja conhecida desde o princípio. Quando Galileu aperfeiçoou a luneta dos holandeses, não tinha ainda uma explicação para o seu funcionamento. Mesmo assim fez avanços observações que tiveram grande impacto para o avanço da ciência.

⁵ Thuillier, Pierre — *De Arquimedes à Einstein: a face oculta da invenção científica*. Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 1994.

1.4. ENSINO DE FÍSICA, HISTÓRIA DA CIÊNCIA E 'NATUREZA DA CIÊNCIA'

Se a história fosse vista como um repositório para algo mais do que anedotas ou cronologias, poderia produzir uma transformação decisiva na imagem da ciência que atualmente nos domina.

Thomas Kuhn

Diversos documentos de orientação curricular, artigos em revistas especializadas e pronunciamentos em congressos refletem a compreensão, cada vez maior, de que a história da ciência tem um papel importante no ensino de ciências. Isso acontece em diversos países, inclusive no Brasil. O parágrafo abaixo é parte integrante do texto dos PCN's.

A Física percebida enquanto construção histórica, como atividade social humana, emerge da cultura e leva à compreensão de que modelos explicativos não são únicos nem finais, tendo se sucedido ao longo dos tempos, como o modelo geocêntrico, substituído pelo heliocêntrico, a teoria do calórico pelo conceito de calor como energia, ou a sucessão dos vários modelos explicativos para a luz. O surgimento de teorias físicas mantém uma relação complexa com o contexto social em que ocorreram. [Brasil 1999]

Este texto foi publicado há mais de dez anos, contudo a abordagem proposta encontra-se ainda distanciada da maioria das salas de aula.

Matthews (1994, p.50) reuniu uma série de argumentos a favor da inclusão da História da Ciência no ensino de ciências. Dentre eles, pode-se destacar que a História da Ciência: 1) promove melhor compreensão de conceitos e métodos científicos; 2) é intrinsecamente valiosa, de modo que episódios importantes como a Revolução Científica, o darwinismo, a descoberta da penicilina e assim por diante - devem ser familiares a todo estudante; 3) é necessária para compreender a natureza da ciência; 4) neutraliza o cientificismo e o dogmatismo que são encontrados frequentemente em manuais de ensino de ciências e nas aulas; 5) pelo exame da vida e da época dos pesquisadores individuais, humaniza a matéria científica, tornando-a menos abstrata e mais interessante aos alunos.

Já se pode perceber, pelas razões acima, que idéias fundamentais da NdC podem ser trabalhadas tendo a História da Ciência como veículo significativo, isto é, a NdC é melhor compreendida quando encontra suporte em episódios científicos reais. A História da Ciência é uma fonte riquíssima de tais episódios, mas eles precisam ser reconstruídos a partir de uma perspectiva filosófica. Não basta apresentar passagens da

história da ciência e esperar que os alunos infiram daí os elementos da NdC, é preciso que os fatos selecionados e a abordagem do texto histórico sejam explícitos quanto aos elementos da NdC que se deseje trabalhar.

Considera-se difícil, hoje, trabalhar todo o conteúdo de física a partir da história, como o famoso Projeto Harvard fez no século passado. A tendência atual, observada nos livros didáticos é fazer algumas inserções histórico-filosóficas, prévia e cuidadosamente preparadas e planejadas com este fim.

É necessária muita cautela com as fontes de consulta de casos históricos [Martins 2001]. Frequentemente os livros didáticos têm apresentado uma história deturpada da ciência, o que acaba resultando na promoção de mitos a respeito desta, ao invés da imagem informada que se deseja. Algumas fontes históricas são fornecidas nas referências deste trabalho.

Como reforço ao que foi dito acima e para reflexão do professor, segue uma passagem do texto 'Física é cultura' de João Zanetic (1989).

A filosofia das ciências naturais, que tem passado por um estimulante debate nas últimas décadas, está suficientemente madura para já constituir um efetivo ingrediente educacional das ciências, sobre as quais desenvolve o seu discurso, e a física, nesse contexto é particularmente privilegiada, pois, além de servir como objeto de estudo preferencial desses filósofos, é a mais adequada a muitas das teorizações devido à sua própria história, tão rica em mutações fundamentais. [Zanetic 1989]

1.5. A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

A Teoria da Gravitação Universal está no cerne daquilo que se convencionou chamar de Revolução Científica e sua história está diretamente ligada ao surgimento da ciência como a compreendemos hoje. Apesar disto, ela tem recebido pouca atenção nos cursos de Física. Seu tratamento geralmente se restringe à apresentação das três Leis de Kepler e da Lei de Newton de Gravitação Universal, ficando sua discussão reduzida à solução de alguns problemas numéricos.

Contudo, além de sua importância dentro do âmbito da Física, a história que conduz à formulação da Teoria de Gravitação Universal, sua validação e subsequentes aplicações, representam um material riquíssimo para evidenciar aspectos importantes da atividade científica, aquilo que temos chamado NdC.

Os textos históricos que se seguem são reconstruções dessa trajetória, escritos com o intuito de explicitar e promover a discussão de elementos da NdC na escola. Eles não pretendem substituir o livro texto adotado pelo professor para seu curso, mas sim fornecer elementos, geralmente ausentes destes livros, que permitam explicitar elementos da NdC. Assim, estes textos se oferecem como material complementar, que pode ser usado na íntegra, ou adaptado de acordo com a conveniência do professor. Apesar de conter elementos da física, lembramos que o objetivo dos textos é oferecer subsídios para uma discussão em torno de elementos da NdC e não oferecer uma apresentação sistemática da física.

No item 1.3 acima, já foram feitas algumas ligações entre passagens da história que culminou com a teoria de gravitação universal e aspectos da natureza da ciência. Nos textos que se seguem procuramos estabelecer outras e sugerir perguntas e projetos que possam ser utilizados pelo professor, com seus alunos, para destacar e aprofundar algumas dessas ligações.

Nos textos a seguir, os elementos de NdC que integram a lista do item 1.3 são identificados por números, correspondentes a sua posição naquela lista. Além de serem elencados no início de cada texto, os números correspondentes a eles surgem em pequenas caixas ao lado das partes do texto em que eles são explicitados. É claro que eles podem surgir em outras partes dos textos e mesmo outros elementos de NdC poderiam ser trabalhados. Procurá-los é um exercício que deixamos para os professores

e alunos interessados. O que se segue é apenas um exemplo de como a NdC e a Física podem ser entrelaçadas num programa mais útil e estimulante para os nossos alunos.

TEXTO 1

Um novo olhar para o céu: o surgimento da ciência

- A CIÊNCIA COMO BUSCA DE EXPLICAÇÕES (4)
- O CARÁTER SOCIAL DA CIÊNCIA (7)

Você certamente já contemplou o céu. Para apreciar a beleza de uma lua cheia, para procurar o Cruzeiro do Sul, as Três Marias, esperar por uma estrela cadente, para ver um cometa passar, ou para admirar um eclipse. Por uma razão ou por outra, todos nós já contemplamos o céu.

Num passado distante, quando não havia computador, televisão, Internet, iPhone, Blackberry ou iPad, o homem olhava muito mais para o céu. Também não havia poluição e nem as luzes da cidade (nem mesmo cidades). Assim, os astros apareciam mais brilhantes e podia-se ver uma quantidade maior deles. Mas, apesar de todo o encanto, havia outros motivos para que o homem se interessasse pelo céu e os movimentos que nele ocorrem.

Há mais ou menos 10.000 anos o homem aprendeu a plantar. Isto foi tão importante que recebeu o nome de Revolução Agrícola. Graças a ela o homem pode parar de correr o mundo atrás de alimento e fixar-se numa região. Contudo, plantar não é apenas uma questão de colocar a semente na terra e jogar água de vez em quando, *há tempo de plantar e tempo de colher*. Era imprescindível marcar a passagem do tempo. Mas como fazê-lo? Lembre-se: estamos falando da pré-história.

De tanto observar o céu o homem percebeu que os astros realizam movimentos periódicos, isto é, que se repetem de tempos em tempos. Esta regularidade permitiu que os povos do passado construíssem calendários. O movimento do Sol deu origem ao conceito de dia e noite, provavelmente nossa primeira unidade de tempo. As fases da lua deram origem ao mês. Uma observação mais atenta do Sol mostrou que ele parece mover-se contra o fundo das estrelas e esse movimento deu origem ao ano. Por sua vez, as estrelas formam uma configuração fixa e diferentes partes dessa configuração são visíveis em diferentes épocas do ano. Ao longo de uma noite, toda a configuração gira em torno de um ponto próximo à Estrela do Norte (para quem está no hemisfério Norte). A fotografia abaixo, figura 1, de longa exposição, mostra esse movimento.



Movimento aparente do Sol ao longo do ano.



Figura 1 – Trilha das estrelas – 8 horas de exposição.

<http://photo.net/nature-photography-forum/00DF8w> acessado em 20/03/2011

Na figura 2 são mostrados cinco corpos celestes, com o tamanho aparente das estrelas, que se movem entre elas realizando trajetórias complexas. São os planetas (palavra que significa astros errantes) visíveis a olho nu – Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Muitos povos antigos como os Maias e os Incas nas Américas e os Chineses realizaram esforços para construir observatórios a partir dos quais pudessem medir as posições do Sol, da Lua e dos planetas. Os Babilônios, os Egípcios e os Chineses fizeram extensos registros das posições dos corpos celestes, que ainda hoje são úteis aos astrônomos. Portanto, essas observações e registros feitos ao longo de milhares de anos forneceram à Astronomia um acúmulo de dados maior do que o de qualquer outra ciência.



Figura 2 – Trajetórias dos planetas vistas da Terra.
<http://astro.if.ufrgs.br/p1/node1.htm> acessado em 27/03/2011.

Apesar disso tudo, nenhum desses povos praticou a astronomia, isto é, nenhum deles fez ciência. Isto porque eles estavam interessados apenas em fazer previsões. Eles acreditavam que os acontecimentos na Terra estavam relacionados com as posições dos astros e, portanto, determinar essas posições com precisão lhes permitiria adivinhar os acontecimentos futuros. Os Babilônios eram exímios em fazer extrapolações a partir de seus dados para prever as posições dos astros. Já os Chineses estavam interessados nas irregularidades, supondo-as sinais dos céus. Quando perceberam que havia regularidade nos eclipses, desinteressaram-se deles. De um modo geral, a astronomia dos povos antigos era povoada de mitos.

Os Gregos estabeleceram uma relação diferente de todos os outros povos do passado com as observações do céu. Interessava-lhes a ordem por trás dos movimentos observados. Contudo, não pararam aí, tentaram *explicar* esses movimentos. Por exemplo, imaginaram a Terra parada no centro do Universo, com todos os outros astros girando ao redor dela presos em esferas concêntricas. Isto é, construíram *modelos* a partir dos quais tentavam explicar todos os movimentos observados no céu. Esta tentativa de construir modelos, de fornecer explicações e fazer generalizações que estejam de acordo com dados de observação está no cerne daquilo que entendemos hoje por ciência.

Os textos seguintes têm o objetivo de apresentar algumas idéias acerca de nossa compreensão do Universo, desde os modelos dos Gregos até a obra de Newton. A intenção é utilizar o desenvolvimento histórico das idéias que levaram à Teoria de Newton da Gravitação Universal para explicitar características da ciência. Pode-se mesmo dizer que o fruto mais importante desse esforço de compreensão do comportamento do Universo não foi a teoria particular, mas sim a forma de desenvolver

esse conhecimento. Com a síntese Newtoniana a ciência, nascida na Grécia, atinge a maturidade.

ATIVIDADES

Questões

- 1) Quais foram as motivações para que o homem antigo observasse e registrasse tão atentamente os movimentos dos corpos celestes?
- 2) De que forma os povos pré-históricos marcam a passagem do tempo?
- 3) O que possibilitou a construção de calendários?
- 4) O texto afirma que: *nenhum desses povos praticou a astronomia, isto é, nenhum deles fez ciência*. Então comente porque esses povos faziam observações?
- 5) Em que difere a postura dos Gregos diante dos movimentos celestes da de outros povos do passado?

Projetos extra classe

- 1) Solicitar que os alunos procurem referências sobre os instrumentos utilizados na pré história e montem um painel para discussão.
- 2) Solicitar que os alunos pesquisem sobre as formas de registro das observações no período a que o texto se refere.
- 3) Solicitar que seus alunos abram o site abaixo para observar uma simulação sobre gravitação Universal: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/gravity-and-orbits>.

TEXTO 2 – A Terra se move? O céu dos Gregos

- A CIÊNCIA DEPENDE DE EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS (1)
- A DISTINÇÃO ENTRE OBSERVAÇÃO E INFERÊNCIA (2)
- A CIÊNCIA COMO BUSCA DE EXPLICAÇÃO (4)
- O CONHECIMENTO CIENTÍFICO TEM UM CARÁTER PROVISÓRIO (6)
- A CIÊNCIA TEM UM COMPONENTE SUBJETIVO (OBSERVAÇÕES SÃO IMPREGNADAS DE TEORIA) (8)
- A CRIATIVIDADE É UMA CARACTERÍSTICA ESSENCIAL DA CIÊNCIA (9)
- CIÊNCIA E TECNOLOGIA NÃO SÃO A MESMA COISA, MAS IMPACTAM UMA SOBRE A OUTRA (10)

Muitos povos utilizaram a matemática para descrever e mesmo prever movimentos celestes, contudo, apenas os Gregos a utilizaram em busca das causas desses movimentos. Ao criar modelos do Universo, os Gregos mantinham um compromisso com as observações, porém, baseavam-se também em suas *visões de mundo*.

8

Sistemas antigos em que a Terra está em Movimento

Pitágoras de Samos (Grécia, 570-495 a.C.) foi o primeiro a defender a idéia de que a verdadeira natureza do mundo é baseada em *relações matemáticas*. Assim, ele e seus discípulos construíram modelos geométricos do Universo utilizando uma série de esferas concêntricas de acordo com a figura 3 abaixo. A Terra, a Lua, o Sol e cinco planetas giravam em torno do fogo central. Este não era visto da Terra graças à Esfera de Oposição, sempre se movendo entre ambos. Segundo este modelo a Terra também rotaciona em torno de seu eixo.

9

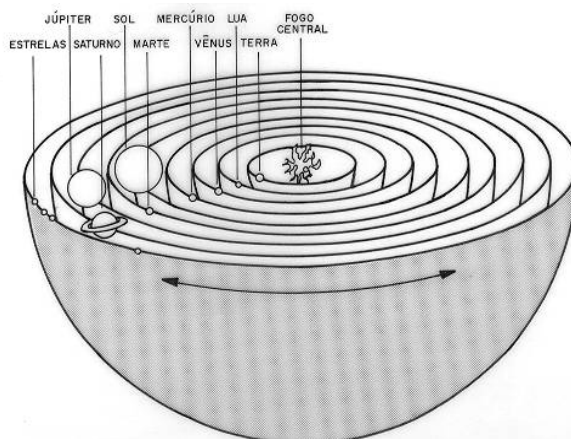


Figura 3 – Modelo de Universo da escola Pitagórica

<http://www.oba.org.br/cursos/astronomia/fundamentoshistastro.htm> - acessado em 29/03/2011

Aristarco de Samos (Grécia, 310 e 230 a.C.) propôs um sistema em que a Terra gira em torno de si (o que explicaria o dia e a noite) e, assim como os outros planetas, gira em torno do Sol (explicando o movimento aparente do Sol e dos planetas). Nesta época já se conhecia o tamanho da Terra, e a discussão era se o Sol e a Lua seriam menores, do mesmo tamanho ou maiores do que a Terra. Aristarco determinou as distâncias da Terra à Lua e da Terra ao Sol, concluindo que a Lua era menor do que a Terra, mas que o Sol era muito maior. Por isso, imaginou que o Sol era mais importante

1

e não poderia girar em torno da Terra. Este argumento não convenceu seus contemporâneos que preferiram modelos com a Terra imóvel. Algumas pessoas podem se surpreender com isso, imaginando Aristarco como um gênio e visionário incompreendido e seus contemporâneos como sendo menos inteligentes ou incompetentes. Todavia, ele não foi capaz de responder satisfatoriamente às críticas dirigidas ao seu modelo como, por exemplo, a falta de evidência de que a Terra se move e a ausência de paralaxe estelar (alteração na posição aparente de uma estrela em função do movimento do observador) na observação das estrelas.

2

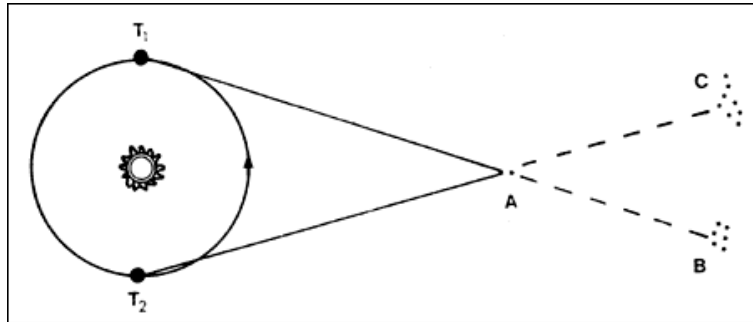


Figura 4 – Paralaxe estelar. Para os defensores da Terra parada, o movimento da Terra deveria fazer com que a estrela corpo A fosse vista entre o grupo de estrelas B e, algum tempo depois, entre o grupo de estrelas C. Isto realmente acontece, mas o fenômeno é muito pequeno para ser observado a olho nu.

10

Sistemas antigos em que a Terra está em Repouso

A importância dada à matemática por Pitágoras foi incorporada por Platão (Grécia, 428-348 a.C.) em sua filosofia. Assim, no século IV a.C., Platão propôs um problema que teve grande influência nos modelos de Universo construídos depois: “Quais são os movimentos uniformes e ordenados cuja existência é preciso supor para explicar os movimentos aparentes dos planetas?”

Platão acreditava que o céu e os corpos celestes eram perfeitos, portanto, seus movimentos também deveriam sê-lo. Para ele as formas perfeitas eram o círculo e a esfera de modo que os movimentos dos astros deveriam ser circulares e uniformes, sempre iguais a si mesmos. Entretanto, seu discípulo Eudoxo (Grécia, 390-338 a.C.) percebeu que, com apenas uma esfera para cada corpo celeste, não seria possível explicar todos os movimentos observados, por exemplo, os planetas realizam movimentos retrógrados em intervalos de tempo que variam de um planeta para outro (figura 5). Então, ele propôs um modelo com várias esferas concêntricas, três para o Sol, três para a Lua e quatro para cada planeta. Deste modo ele conseguiu explicar todos os movimentos aparentes dos astros.

8



Figura 5 – Movimento retrógrado de Marte: seu movimento é observado no céu em relação às estrelas fixas. Note que ele parece 'retornar' no céu, ou fazer um loop.

Não há evidências de que Eudoxo tenha pensado suas esferas como objetos físicos reais, elas seriam apenas um artifício matemático. Porém, Aristóteles (Macedônia, 384-322 a.C.) interpretou-as como esferas cristalinas, materiais, acrescentando outras, num total de 55 esferas, todas movidas pela mais externa.

As idéias de Aristóteles tiveram grande influência no desenvolvimento do pensamento ocidental e da própria ciência. Por isso, vamos apresentar alguns elementos de sua Física, que têm relação com o desenvolvimento da Astronomia e da Gravitação Universal.

O Universo é dividido em dois mundos: (1) o sublunar, onde está a Terra e (2) o Céu, onde estão a Lua, o Sol, os planetas e as estrelas.

No mundo sublunar tudo é constituído dos quatro elementos: terra, água, ar e fogo. Cada elemento possui seu lugar natural, o do elemento terra é no centro do Universo, da água é sobre a terra, do ar é sobre as águas e do fogo é próximo da esfera da Lua. O estado natural dos corpos é o repouso no lugar natural de seu elemento predominante. Assim, como a Terra é constituída prioritariamente do elemento terra, ela está no centro do Universo. Os corpos se movem em linha reta para o seu lugar natural, sem que haja a necessidade de que *algo* atue sobre eles. Este é o 'movimento natural'. Para qualquer outro tipo de movimento que não seja o de cair para o centro da Terra ou subir se afastando dele, é necessário que haja um movente, isto é, algo externo que atue sobre ele. Este é o 'movimento violento'.

No Céu, todos os corpos são feitos de um quinto elemento, puro, incorruptível, chamado éter. Todos os corpos são perfeitamente esféricos e o movimento natural é o circular uniforme em torno do centro do Universo. Tanto a matéria quanto as regras destes dois mundos (sublunar e Céu) são totalmente distintas e independentes.

É importante notar que na Física aristotélica (sua explicação dos fenômenos do mundo sublunar) para que um corpo se mova é necessário algo para movê-lo. Somente com uma Física inercial (completada como trabalho de Newton, quase dois mil anos depois) os proponentes de uma Terra em movimento puderam contestar as críticas de seus opositores.

Outro ponto importante é notar que o que Aristóteles chama de gravidade não é uma força como na Teoria Newtoniana, mas simplesmente a propriedade dos graves (corpos pesados) de buscarem seu lugar natural.

O Sistema Geocêntrico de Ptolomeu

Claudio Ptolomeu (Grécia, 90-168 d.C.) foi um importante astrônomo que viveu e trabalhou na cidade de Alexandria, no Egito. Ele propôs um modelo geocêntrico (e geostacionário) através do qual as posições dos planetas podiam ser preditas com grande precisão. Durante séculos seu modelo permaneceu como a explicação do universo.

Seu modelo consistiu numa tentativa de acomodar os movimentos aparentes dos planetas, que não são nem circulares e nem uniformes, em movimentos circulares e uniformes. Confuso? O esquema abaixo (figura 6) ajuda a compreender o que ele fez. Para ajustar os complexos movimentos aparentes dos planetas (mudança de distância, mudança de velocidade, retrogradação) com a idéia de movimentos circulares e uniformes, Ptolomeu criou o seguinte modelo:

- 1) O planeta gira com movimento circular uniforme num epiciclo;
- 2) O centro do epiciclo (ponto C) gira sobre o deferente com movimento uniforme em relação a um ponto Q (equante).

9

4

9

3) O ponto Q e a Terra estão igualmente distantes do centro do deferente (ponto A) e estão em oposição.

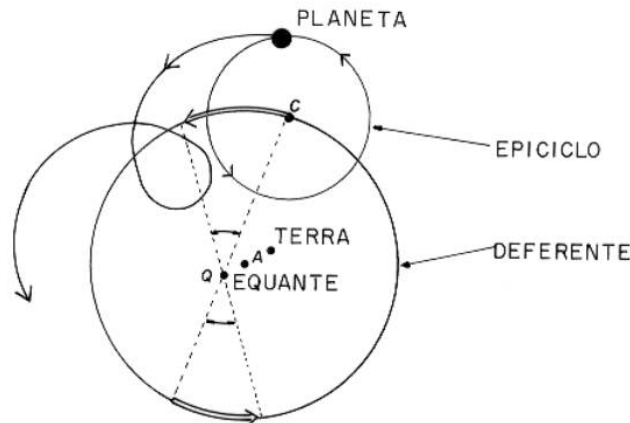


Figura 6 – Sistema de Ptolomeu com epiciclo, deferente e equante, para um planeta.

Ptolomeu foi capaz de ajustar os períodos de revolução dos planetas nos epiciclos e dos centros dos epiciclos nos deferentes de modo a que eles reproduzissem os movimentos observados. A figura 7 mostra uma visão mais ampla do sistema de Ptolomeu. Como Mercúrio e Vênus nunca são observados distantes do Sol, Ptolomeu colocou o centro de seus epiciclos numa linha ligando a Terra ao Sol. O sistema de Ptolomeu permitiu a previsão de posições planetárias com precisão de aproximadamente 1° e prevaleceu como sistema astronômico por 1400 anos.

- 1
- 2
- 6

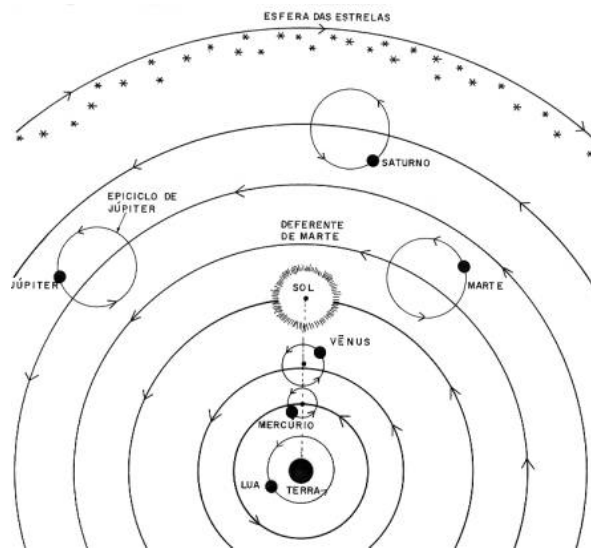


Figura 7 – O Sistema Geocêntrico e Geostacionário de Ptolomeu.

Questões

- 1) Pitágoras de Samos (Grécia, 570-495 a.C.) foi o primeiro a defender a idéia de que a verdadeira natureza do mundo é baseada em *relações matemáticas*. Qual a idéia de Pitágoras sobre a natureza do mundo?

- 2) Qual foi a proposta de Platão que influenciou os modelos de universo construídos depois?
- 3) Como era constituída a matéria no universo de Aristóteles?
- 4) Como explicava Aristarco o fato de haver dia e noite na Terra?
- 5) O que é o conceito de gravidade para Aristóteles?
- 6) Era possível prever as posições planárias com o modelo de Ptolomeu?
- 7) Com que precisão Ptolomeu conseguiu fazer suas medidas?

Projetos

- 1) Fazer uma maquete do modelo ptolomaico.
- 2) **COMO SABEMOS?** Os alunos podem fazer um projeto (levantamento bibliográfico na Internet) sobre os métodos utilizados para determinar o tamanho da Terra ao longo do tempo.
- 3) **SAIBA MAIS.** Pedir aos alunos para procurar informação sobre o papel de Alexandria como centro de conhecimento das artes e da ciência.
- 4) Propor uma pesquisa: Quais teriam sido as condições sociais, políticas e culturais que favoreceram o surgimento da ciência na Grécia?

TEXTO 3 – A obra de Copérnico: deslocando a Terra do centro do Universo.

- A CIÊNCIA DEPENDE DE EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS (1)
- O CONHECIMENTO CIENTÍFICO É PARCIMONIOSO (5)
- O CONHECIMENTO CIENTÍFICO TEM UM CARÁTER PROVISÓRIO (6)
- CARÁTER SOCIAL DA CIÊNCIA (7)
- A CIÊNCIA TEM UM COMPONENTE SUBJETIVO (OBSERVAÇÕES SÃO IMPREGNADAS DE TEORIA) (8)

O MODELO DE COPÉRNICO

A visão dominante sobre o Universo, na Europa medieval, era a de que a Terra encontra-se imóvel no centro e todos os outros corpos celestes giram em torno dela. Os fenômenos terrestres e celestes eram entendidos e explicados segundo a Física de Aristóteles e o Sistema de Ptolomeu.

No modelo proposto pelo monge católico polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) o Sol encontra-se imóvel no centro enquanto a Terra e os demais planetas giram em torno dele. Copérnico não inventou o sistema heliocêntrico, mas deu a ele um tratamento matemático tão metódico e rigoroso quanto Ptolomeu ao sistema geocêntrico. Considera-se hoje que esse trabalho de Copérnico iniciou uma revolução na ciência. O livro em que Copérnico publicou essas idéias “Sobre as Revoluções dos Orbes Celestes” (*De Revolutionibus Orbium Coelestium*), publicado em 1543, passou a integrar a lista de livros proibidos pela Igreja em 1616.

A ironia está no fato de que Copérnico era, sob vários aspectos, um conservador mais do que um revolucionário. Católico e aristotélico percebeu que o sistema ptolomaico não estava em estrito acordo com o universo esférico de Aristóteles e tentou restaurá-lo. A figura 8 é a expressão artística do modelo copernicano.

7

8

CRÍTICAS AO SISTEMA DE COPÉRNICO

Argumentos mecânicos:

1) O argumento da torre. Se a Terra gira sobre o seu eixo, qualquer ponto de sua superfície irá deslocar-se em um segundo. Portanto, uma pedra abandonada do alto de uma torre cairia em direção ao centro da Terra enquanto a torre se move acompanhando o movimento da Terra. Deste modo, a pedra teria que cair distante do pé da torre, o que, de fato, não acontece.

2) Se a Terra gira, por que objetos soltos sobre a sua superfície não são lançados longe, como uma pedra sobre um disco em rotação? Se ela move-se em torno do Sol, por que não deixa a Lua para trás?



Figura 8 – Sistema heliocêntrico copernicano.

Argumentos astronômicos:

1) Ausência de paralaxe estelar. Esta crítica já havia sido dirigida ao sistema de Aristarco. Uma possível resposta para isto é que as estrelas estão a uma distância muito maior do que se supunha, pelo menos mil vezes mais longe da Terra do que o raio da órbita terrestre.

2) De acordo com o modelo de Copérnico os tamanhos aparentes dos planetas deveriam mudar com o tempo, uma vez que a distância entre a Terra e eles varia. Contudo, as observações feitas na época de Copérnico, a olho nu, de Marte e Vênus, não reproduziam as variações esperadas. Somente cem anos mais tarde, com o telescópio, puderam-se constatar essas mudanças em seus tamanhos aparentes.

10

VANTAGENS DO SISTEMA COPERNICANO

A maior vantagem do sistema copernicano é a simplicidade conceitual. Por exemplo, o movimento de retrogradação dos planetas, que no modelo geocêntrico exigia epiciclos e deferentes, passa a ser entendido como uma consequência natural do movimento da Terra. Deste modo, o movimento real dos planetas aconteceria num único sentido, nós é que o veríamos retrogradar por estarmos num referencial em movimento, como mostra a figura 9.

5

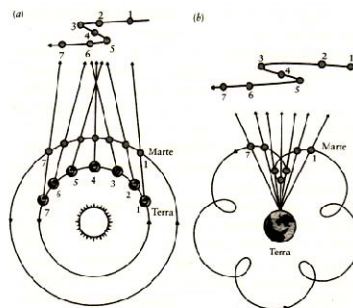


Figura 9 – Retrogradação de Marte: (a) no modelo heliocêntrico; (b) no modelo geocêntrico.

O fato de Mercúrio e Vênus serem vistos sempre próximos do Sol também tem uma explicação mais natural no sistema heliocêntrico. Isto é decorrência de suas órbitas serem internas à da Terra, isto é eles estão entre a Terra e o Sol. Ptolomeu precisou impor que os centros dos epiciclos de Mercúrio e Vênus estivessem sempre na linha que liga a Terra ao Sol para acomodar seu modelo com os dados da observação.

Outra vantagem do sistema de Copérnico é possibilitar, pela primeira vez, uma determinação das distâncias no sistema solar relativas ao raio de órbita da Terra. Tomando o raio da Terra como unidade (U.A. = unidade astronômica) temos na tabela

abaixo uma comparação entre os valores encontrados por Copérnico e os valores aceitos hoje.

Tabela 1. Comparação dos raios médios das orbitas dos planetas conhecidos medidos por Copérnico com dados atuais.

Planeta	Raio Médio da órbita em U.A. ($R_T = 1U.A.$)	
	Copérnico	Atual
Mercúrio	0,3763	0,3871
Vênus	0,7193	0,7233
Marte	1,5198	1,5237
Júpiter	5,2192	5,2028
Saturno	9,1743	9,5388

É comum dizer-se que o sistema copernicano é muito mais simples do que o ptolomaico. Qualitativamente, isto é verdade. O movimento de retrogradação dos planetas (a figura 9 compara este movimento nos dois modelos) e a proximidade de Mercúrio e Vênus do Sol ganham explicações mais simples e naturais no modelo copernicano. Porém, para fazer previsões precisas das posições dos planetas, Copérnico teve que introduzir 34 epiciclos em seu modelo. Ainda assim, suas previsões não eram melhores do que as de Ptolomeu. Como podemos observar, a simplicidade do modelo copernicano é apenas conceitual, no que diz respeito aos cálculos ele é tão complexo quanto o ptolomaico e apenas tão preciso quanto.

Copérnico não pode responder satisfatoriamente a todas as críticas dirigidas ao seu modelo, pois isto exigiria uma nova Física e ele estava, de certo modo, comprometido com a Física de Aristóteles. Sem os trabalhos de Kepler, Galileu e Newton estas críticas não poderiam ser totalmente afastadas. Contudo, a obra de Copérnico serviu como uma mola propulsora para avanços, tanto na astronomia (com Kepler) quanto no estudo do movimento (com Galileu). A ironia está em que provavelmente, Copérnico não iria gostar dos avanços em nenhuma dessas áreas.

6

ATIVIDADES

Questões

- 1) Como é compreendido o movimento de retrogradação dos planetas no modelo copernicano?
- 2) Qual seria o movimento real dos planetas visto por um observador que está num referencial em movimento?
- 3) Pode-se dizer que o sistema copernicano é mais simples do que o ptolomaico? Justifique.
- 4) Porque Copérnico não consegue refutar as criticas ao seu modelo?

Projetos

- 1) CIÊNCIA E CONTEXTO. Pesquisar o contexto social, cultural e político da época em que Copérnico desenvolveu sua Teoria.
- 2) A qualidade dos dados de Copérnico. Como ele obteve essas medidas?
- 3) Peça aos seus alunos uma visita a um Site que mostra a posição dos planetas em tempo real em uma animação em 3D:
http://odia.terra.com.br/portal/digital/html/2011/4/site_mostra_posicao_dos_planetas_em_3d_156608.html#

TEXTO 4 – Observação e Teoria: as contribuições de Brahe e Kepler

- A CIÊNCIA DEPENDE DE EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS (1)
- A DISTINÇÃO ENTRE OBSERVAÇÃO E INFERÊNCIA (2)
- O CONHECIMENTO CIENTÍFICO É PARCIMONIOSO (5)
- O CONHECIMENTO CIENTÍFICO TEM UM CARÁTER PROVISÓRIO (6)
- CARÁTER SOCIAL DA CIÊNCIA (7)
- A CRIATIVIDADE É UMA CARACTERÍSTICA ESSENCIAL DA CIÊNCIA (9)
- CIÊNCIA E TECNOLOGIA NÃO SÃO A MESMA COISA, MAS IMPACTAM UMA SOBRE A OUTRA (10)

TYCHO BRAHE (1546-1601)

A importância do dinamarquês Tycho Brahe para a história de nossa compreensão do Universo deve-se a sua tenacidade e cuidado na observação e registro das posições dos planetas. Ele dedicou sua vida a isso. Suas observações foram feitas a olho nu, mas com instrumentos de grandes proporções (figura 10). Isto era importante para melhorar a precisão de suas medidas o que também decorria de suas habilidades próprias. Deste modo, seus dados eram, pelo menos, duas vezes mais precisos do que os dados anteriores.

10



Figura 10 – Instrumentos utilizados por Tycho Brahe.

Copérnico havia proposto seu modelo com base nos mesmos dados utilizados por Ptolomeu. A obtenção de novos e melhores dados poderia levar à descoberta de fenômenos novos ou solucionar a disputa entre modelos rivais. Podia também levar à proposta de novos modelos. Foi o que fez Tycho Brahe. Ele propôs um modelo que era um híbrido dos modelos ptolomaico e copernicano, de acordo com a figura 11 abaixo. Nele, a Terra continua imóvel no centro do Universo com a Lua e o Sol girando ao seu redor. A diferença é que os planetas giram ao redor do Sol e não da Terra. Tycho rejeitou o modelo copernicano por não ter sido capaz de observar qualquer paralaxe estelar. A paralaxe a ser observada no caso da Terra se mover depende da distância dela às estrelas. Tycho considerou as estrelas muito mais próximas do que estão de fato, esperando ver uma paralaxe que, sabemos hoje, existe, mas não poderia ter sido observada com os instrumentos de Tycho a olho nu. Somente mais tarde, com a

2

invenção do telescópio, a pequena paralaxe estelar, devida ao movimento da Terra, pode ser detectada.

Apesar de não ter conseguido se libertar da imobilidade da Terra, e se manter, de algum modo preso à tradição, Tycho Brahe legou à posteridade e, particularmente, a seu assistente Kepler, dados sobre o sistema planetário com precisão suficiente para, em mãos habilidosas, promover o rompimento com uma tradição milenar – o círculo.

1

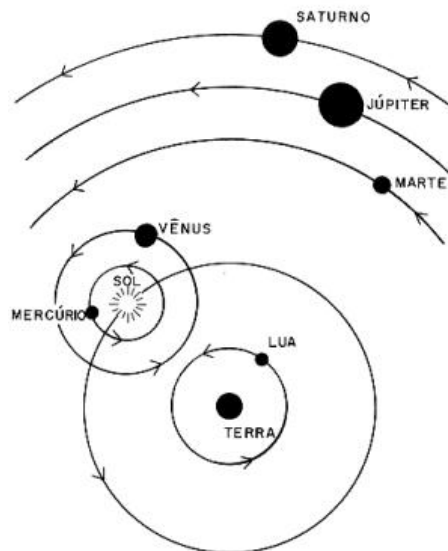


Figura 11 – Modelo planetário de Tycho Brahe, um híbrido de Ptolomeu e Copérnico.

JOHANNES KEPLER (1571-1630)

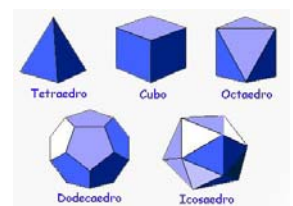
A simplicidade sempre foi uma meta da ciência. Aristóteles já dizia que *A natureza não faz, em vão, nada supérfluo*. E, no século XIV, Guilherme de Occam propôs um princípio de parcimônia que ficou conhecido como a navalha de Occam. Inicialmente, a proposta dos Gregos era simples. A Terra estaria imóvel no centro do Universo e todos os astros girariam em esferas concêntricas com ela. Porém, a necessidade de reproduzir os movimentos observados fez com que os modelos fossem se complicando. Surgiram os epiciclos, deferentes e o centro das órbitas foram deslocados da Terra. O trabalho realizado por Kepler sobre os dados de Tycho Brahe resgatou o ideal de simplicidade, mas isso teve um preço que o próprio Kepler relutou em pagar.

5

Johannes Kepler foi um astrônomo alemão que dedicou sua vida a encontrar a ordem por trás dos movimentos dos planetas. Ele pode ser contado entre os continuadores da tradição pitagórica e platônica que supunha o Universo construído a partir de um plano matemático e geométrico. Chegou mesmo a escrever: *A Geometria existiu antes da Criação. É co-eterna com a mente de Deus... A Geometria forneceu a Deus um modelo para a Criação... A Geometria é o próprio Deus*.

7

Kepler conheceu os modelos de Ptolomeu e Copérnico e tornou-se árduo defensor do heliocentrismo. Assim, para ele, havia seis planetas (a Terra seria um deles). Kepler se perguntava por que só havia seis planetas e por que as distâncias entre eles eram aquelas determinadas por Copérnico. Teve então a idéia de que a explicação deveria estar associada ao fato de só haver cinco poliedros regulares, também conhecidos como poliedros de Platão. Imaginou que entre as esferas de



cada par de planetas vizinhos deveria haver um sólido regular que ditaria a distância entre elas (figura 12). Comparou seus resultados com os valores calculados por Copérnico para os raios das órbitas planetárias, mas o acordo entre eles não era muito bom. Para resolver este problema Kepler entendeu que precisava de dados mais precisos. Por isso foi trabalhar com Tycho Brahe.

1

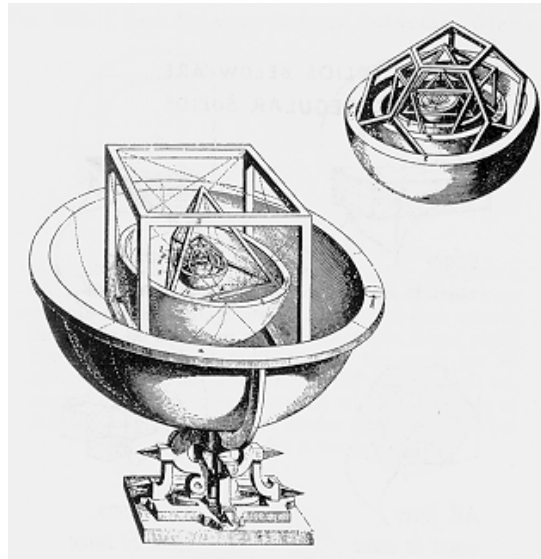


Figura 12 – Os poliedros de Platão e as órbitas dos planetas segundo Kepler.

A colaboração com Brahe não teve o efeito que Kepler desejava. Aquele, apenas a custo, fornecia algum dado sobre o movimento dos planetas, e eram sempre fragmentários. Contudo, após um ano, Brahe morre deixando para Kepler o maior e mais exato conjunto de dados acerca do movimento dos planetas reunido até então. De início, ele tentou acomodar os dados ao sistema de Brahe, como havia prometido, mas não obteve sucesso. Em seguida, passa a trabalhar com o modelo de Copérnico, mas encontra um desvio de 8 minutos de arco para a órbita de Marte. Esta diferença era pequena e compatível com os dados usados por Copérnico, mas Kepler sabia que as observações de Brahe, extremamente precisas, eram confiáveis dentro de 4 minutos de arco. Esses 8 minutos de arco deram origem ao rompimento com o conceito mais arraigado e permanente da história da astronomia: o círculo.

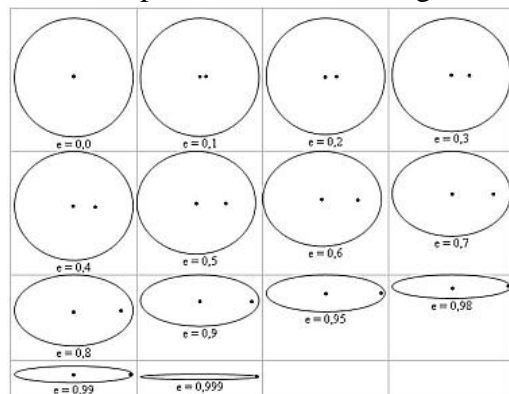
1

2

9

As Leis de Kepler

O círculo era considerado a forma perfeita e, portanto, a única digna dos movimentos no céu – o mundo perfeito. Copérnico, Tycho e até mesmo Galileu acreditavam em um movimento planetário circular e uniforme. Após exaustivas tentativas de acomodar as órbitas planetárias a movimentos circulares sem sucesso, Kepler resolve tentar formas ovais. Ele comete erros que se cancelam, chega à equação da elipse, mas a rejeita. Tenta outro caminho e, mais tarde, chega à elipse novamente conseguindo um acordo maravilhoso com os dados. Assim,



6

9

Kepler enuncia aquela que seria conhecida como sua primeira lei: *As órbitas descritas pelos planetas em torno do Sol são elipses com o Sol num dos focos.*

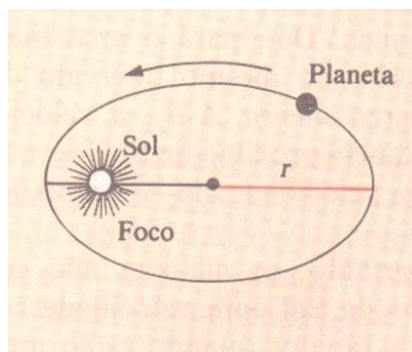


Figura 13 – Órbita elíptica de um planeta com o Sol num dos focos da elipse. A figura está exagerando a excentricidade da elipse, as órbitas são elipses muito próximas da circunferência.

Suas outras duas leis também estabelecem regularidades matemáticas para os movimentos planetários. A segunda estabelece que: “O raio vetor que liga um planeta ao Sol descreve áreas iguais em tempos iguais”. A terceira apresenta uma relação entre os períodos de revolução dos planetas em torno do Sol e os raios médios de suas órbitas (representados por r na figura 13): “Os quadrados dos períodos de revolução de dois planetas quaisquer estão entre si como os cubos de suas distâncias médias ao Sol.” A Tabela 1 mostra essa relação utilizando como unidade de distância o raio terrestre (1 U.A. = unidade astronômica) e como unidade de tempo o período da Terra (1 ano terrestre).

Tabela 1. Comparação dos valores calculados por Kepler com os atuais.

Planeta	Valores de Copérnico			Valores atuais		
	T (anos)	R (U.A.)	T^2/R^3	T (anos)	R (U.A.)	T^2/R^3
Mercúrio	0,241	0,38	1,06	0,241	0,387	1,00
Vênus	0,614	0,72	1,01	0,615	0,723	1,00
Marte	1,881	1,52	1,01	1,881	1,524	1,00
Júpiter	11,8	5,2	0,99	11,862	5,203	1,00
Saturno	29,5	9,2	1,12	29,457	9,539	1,00

O acordo é notável! Porém, Kepler interpretou de forma literal esta harmonia no movimento dos planetas, supondo mesmo que eles emitiriam notas musicais em seus movimentos pelo céu. A figura 14 mostra as melodias entoadas por cada planeta segundo Kepler em seu livro “Harmonias do Mundo”.

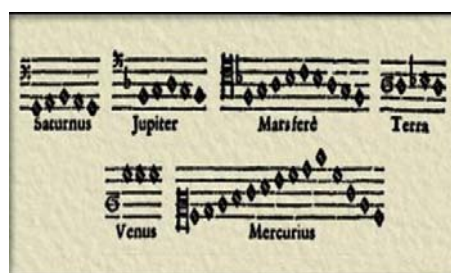


Figura 14 – Melodias dos planetas de acordo com Kepler (“Harmonices Mundi”).

Podem-se destacar três razões pelas quais o trabalho de Kepler foi importante. Primeiro, e o mais comumente divulgado, ele predisse corretamente a trajetória dos planetas em torno do Sol. Elas são elípticas. Este resultado será importante para o desenvolvimento futuro da Gravitação Universal por Newton. Segundo, ele foi capaz de abandonar suas pressuposições metafísicas (as órbitas circulares afastadas por sólidos regulares, idéia que ele muito estimava) em favor do acordo com os dados da observação. Ao mesmo tempo em que se alinhava com o pitagóricos do passado em sua relação mística com os números, Kepler dava um passo largo em direção ao futuro e à ciência moderna com sua insistência no acordo entre teoria e a evidência empírica. Terceiro, ele pensou os movimentos dos planetas em termos de causas físicas, isto é, além de descrever seus movimentos (cinemática), Kepler procurou a causa por trás daqueles movimentos.

1

4

Kepler realizou estudos com a luz que o levaram a descobrir que a intensidade luminosa cai com o quadrado da distância, isto é, se a uma distância d de uma fonte a intensidade luminosa é i , a uma distância $2d$ será $i/4$ e a uma distância $3d$ será $i/9$. Além disso, ele conhecia o trabalho de William Gilbert (*De Magnet*, 1600) em que a Terra é apresentada como um grande ímã. Com base nisso, ele imaginou que os planetas se moveriam sob a ação de uma força magnética com origem no Sol. Esta força não atuaria em todas as direções, mas apenas no plano de órbita dos planetas. Hoje sabemos que ele estava errado, mas a idéia essencial de que o movimento dos planetas é guiado por alguma causa física ligada ao Sol estava correta, até mesmo na relação com a distância, e foi importante para desenvolvimentos futuros.

6

8

9

ATIVIDADES

Questões

- 1) Comente a citação de Aristóteles sobre a simplicidade da ciência.
- 2) Como se explica que as observações de Tycho Brahe, feitas a olho nu, fossem tanto mais precisas que as anteriores?
- 3) Qual foi o problema de Tycho quando observou a paralaxe das estrelas?
- 4) O que de fato possibilitou observar a paralaxe estelar?
- 5) O que levou Kepler a procurar os dados de Tycho Brahe?
- 6) Por que podemos dizer que o trabalho de Kepler resgatou o ideal de simplicidade?
- 7) Qual era a forma considerada perfeita?
- 8) Como seria o movimento planetário para Copérnico e Tycho?
- 9) Qual era a natureza da força que Kepler imaginou existir para manter os planetas nas suas órbitas em torno do Sol?
- 10) Destaque as razões pelas quais o trabalho de Kepler foi tão importante para o desenvolvimento da ciência.

Projetos

1. Fazer um levantamento dos instrumentos utilizados por Tycho Brahe.
2. Construir uma elipse de forma concreta para verificar que o círculo é o limite da elipse quando os focos coincidem.
3. Peça aos seus alunos para debater a relação entre ciência e tecnologia com base no exemplo de Tycho Brahe e Kepler.

TEXTO 5 – Galileu: para uma Física da Terra em Movimento

- A CIÊNCIA DEPENDE DE EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS (1)
- DISTINÇÃO ENTRE OBSERVAÇÃO E INFERÊNCIA (2)
- A CIÊNCIA COMO BUSCA DE EXPLICAÇÃO (4)
- O CONHECIMENTO CIENTÍFICO É PROVISÓRIO (6)
- O CARÁTER SOCIAL DA CIÊNCIA (7)
- A CIÊNCIA TEM UM COMPONENTE SUBJETIVO (OBSERVAÇÕES SÃO IMPREGNADAS DE TEORIA) (8)
- CIÊNCIA E TECNOLOGIA NÃO SÃO A MESMA COISA, MAS IMPACTAM UMA SOBRE A OUTRA (10)

A maior contribuição para a defesa do sistema copernicano veio da obra do físico e matemático italiano Galileu Galilei (1564-1642). Podem-se classificar suas contribuições em dois grupos: astronômicas e mecânicas. Fazem parte do primeiro grupo suas observações com a luneta e do segundo, seus esforços por estabelecer uma física inercial.

É comum que se diga que Galileu provou que a Terra se move em torno do Sol, resolvendo definitivamente a disputa entre os sistemas geocêntrico e heliocêntrico. Porém, a história se mostra bem mais complexa que isso. Em primeiro lugar, é importante salientar que algum desacordo entre observação e teoria (nesse caso, modelos planetários) não costuma ser suficiente para que se abandone a teoria. Temos visto diversas tentativas de contornar isso. Em segundo lugar, apesar de oferecerem algum suporte para o sistema de Copérnico, as contribuições de Galileu foram mais eficientes em rebater as críticas ao heliocentrismo do que em prová-lo, o que não é, absolutamente, a mesma coisa. Vejamos, então, de que modo Galileu se insere no contexto da evolução dos modelos planetários para a construção de uma teoria de Gravitação Universal.

8

Contribuições astronômicas

Em 1609 Galileu aponta para o céu, pela primeira vez, um instrumento inventado na Holanda, e que ele aperfeiçoou – a luneta. Isto foi um marco na história da Astronomia. Há momentos na história da ciência em que determinados avanços tecnológicos tem um profundo impacto. É o caso em questão. A luneta permitiu a observação de aspectos do céu, dos astros e seus movimentos, impossíveis a olho nu. Ao apontar sua luneta para o céu, Galileu fez uma série de observações incompatíveis com o sistema geocêntrico de Ptolomeu.

10

A lua era vista como um corpo celeste, portanto deveria ser perfeita como tudo no céu. Apontando sua luneta para ela, Galileu percebeu que sua superfície se parecia muito mais com a da imperfeita Terra do que com uma esfera lisa e polida como o pretendiam os aristotélicos. Na verdade, ela possuía montanhas e depressões (figura 15). Através de sua engenhosidade e habilidade matemática chegou mesmo a calcular a altura de algumas dessas montanhas da Lua.

1

2

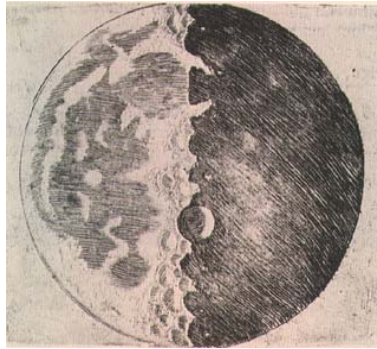


Figura 15 – Aquarela da Lua feita por Galileu ao observá-la como sua luneta.

Outra observação feita por Galileu, que colocava em dificuldades o modelo ptolomaico, mas se ajustava naturalmente ao copernicano, foi a de luas em Júpiter. A princípio, os pequenos corpos brilhantes observados perto de Júpiter poderiam ser considerados estrelas não vistas antes. Contudo, a observação continuada da Galileu mostrou que eles acompanhavam Júpiter mesmo em seu movimento retrógrado e que nunca se afastavam muito dele (figura 16). Com isso, concluiu que estariam ligados a ele. Galileu chegou a determinar seus períodos de revolução em torno de Júpiter. Logo, a idéia de que todos os corpos celestes têm que girar em torno da Terra não se ajusta a essa observação. Por outro lado, diminui a barreira que separa a Terra (com sua Lua) dos outros astros celestes, ajudando a entendê-la como mais um deles.

1

2

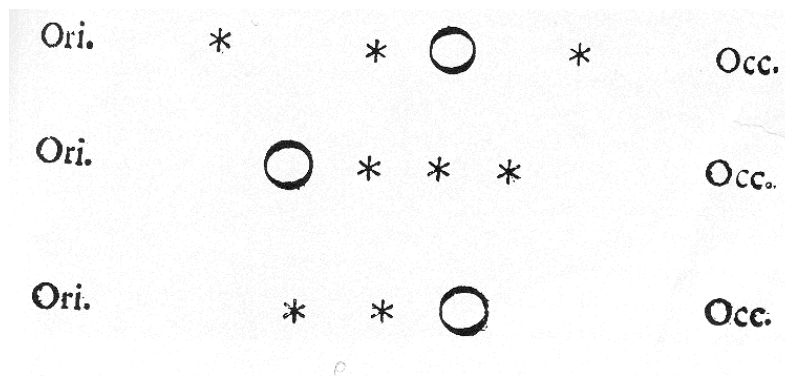


Figura 16 – Desenho das luas de Júpiter publicado por Galileu em seu livro O Mensageiro das Estrelas (*Sidereus Nuncius*).

Não se esgotam aí as observações de Galileu com a luneta, mas iremos considerar apenas mais uma. Observando Vênus através da luneta, Galileu percebeu que o planeta apresenta fases. A existência de fases é consequência das posições relativas do observador (no caso, da Terra), de Vênus (que não possui luz própria) e do Sol. A figura 17, a seguir, mostra que, de acordo com o sistema de Ptolomeu (à esquerda) não deveriam ser observadas fases em Vênus, ao passo que o sistema de Copérnico (à direita) as pressupõe.

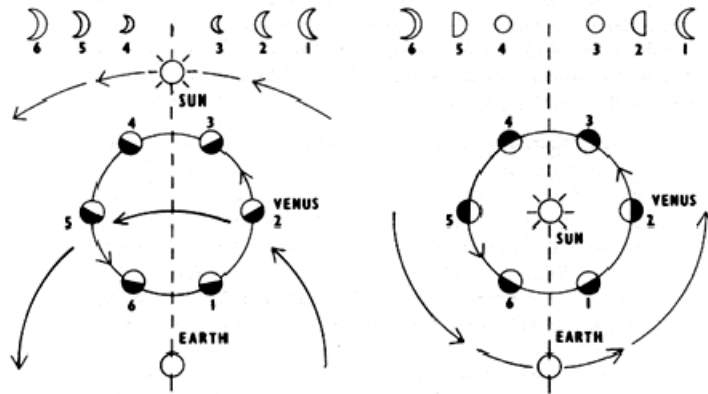


Figura 17 – Aparência de Vênus visto da Terra, segundo os modelos de Ptolomeu (à esquerda) e de Copérnico (à direita). Note que apenas de acordo com o segundo Vênus apresenta fase.

Diante dessas observações de Galileu pode parecer estranho que nem todos tenham se convencido imediatamente da superioridade do sistema copernicano sobre o ptolomaico. A explicação mais comumente encontrada para isso é que seus oponentes eram retrógrados, pouco inteligentes, ou defendiam interesses pessoais. Contudo, mais uma vez, a explicação não parece ser tão simples. Essa história contada da perspectiva de hoje, e que separa seus personagens em heróis bons e infalíveis e adversários maus e ignorantes dificilmente dará conta dos acontecimentos passados. Sem desconsiderar as questões políticas e sociais e o papel restritivo que a Igreja representava na época, outra classe de argumento pode ser alinhada para ajudar a compreender a não aceitação imediata das idéias de Galileu. Por exemplo, por que se deveriam preferir as observações com a luneta às feitas a olho nu? Uma explicação pormenorizada do funcionamento da luneta poderia responder a pergunta, contudo, Galileu não deu tal explicação. Kepler começou a estudar a luneta para fornecer uma teoria de seu funcionamento, mas tal teoria só foi completamente desenvolvida com a contribuição de outros, décadas depois. Outra solução seria mostrar que ela funciona para ampliar e aproximar objetos terrestres, logo, deve fazer o mesmo com o céu. Entretanto, a luneta introduz aberrações na imagem. Na observação de objetos terrestres e, portanto, conhecidos, sabemos descontar essas aberrações, mas, e no caso do céu? Não podemos ir lá, observar de perto, para saber como as coisas realmente são. De fato, nem todas as crateras que Galileu observou na Lua existem. Sabemos hoje que, em geral, as observações de Galileu estavam corretas e foram fundamentais para o desenvolvimento da ciência, porém temos que ser mais cuidadosos ao julgar o passado, quando o conhecimento era outro.

7

10

8

Contribuições mecânicas

Apesar do grande valor de suas contribuições astronômicas – Galileu não engendrou nenhum modelo, mas contribuiu muito para o estabelecimento do modelo de Copérnico – considera-se, hoje, que sua maior contribuição tenha sido o desenvolvimento de uma física do movimento – de uma mecânica. Um dos grandes problemas enfrentados pelos proponentes do heliocentrismo era como explicar certos fenômenos na Terra. A Física adotada na época era a Aristotélica e essa era incompatível com uma Terra em movimento. As críticas a uma Terra em movimento foram apresentadas no texto 3 sobre Copérnico. Portanto, quem quer que se lance em defesa do sistema heliocêntrico deveria explicar como uma esfera abandonada do alto

4

6

de uma torre cai no pé da mesma, ou porque não somos todos jogados para fora da Terra em rotação. O caso da torre, Galileu conseguiu resolver. O fato de que corpos soltos na superfície da Terra não são lançados para fora só seria satisfatoriamente explicado no âmbito da teoria de Gravitação Universal, desenvolvida mais tarde por Isaac Newton. Este, porém, não poderia tê-la concebido sem as contribuições de seus predecessores, dentre os quais se destaca Galileu. A compreensão que temos do movimento hoje é dada quase que integralmente pela mecânica Newtoniana, dentro da qual o conceito de inércia ocupa um lugar de destaque. Galileu foi um dos construtores de tal idéia. Dentre suas contribuições para uma ciência do movimento podem-se contar as seguintes: (1) distinguiu claramente a diferença entre velocidade e aceleração; (2) mostrou que corpos em queda caem com aceleração constante, independentemente de seu peso; (3) que esses mesmos corpos caem distâncias proporcionais ao quadrado do tempo de queda; (4) concebeu uma inércia circular através da qual um corpo permaneceria em movimento uniforme num plano horizontal em volta da Terra; (5) desenvolveu o conceito de movimento relativo; (6) aplicou seu conceito de inércia na decomposição do movimento de um projétil, determinando sua trajetória parabólica; (7) negou o conceito aristotélico de que para haver movimento tem que haver um movente; e (8) argumentou que o movimento uniforme e o repouso de um sistema não podem ser distinguidos por meios mecânicos dentro do próprio sistema, somente apelando-se para um referencial externo.

9

Esses desenvolvimentos foram graduais e se deram, em parte a partir de experiências reais, em parte através de experiências de pensamento. De fato, a extensão com que Galileu realizou experimentos é uma questão ainda não resolvida na História da Ciência. O fato é que com sua argumentação baseada em experimentos (realizados ou pensados) e apoiada por um desenvolvimento matemático seguro, Galileu ofereceu a primeira defesa consistente do modelo de Copérnico, contra as críticas que lhe eram dirigidas.

9

ATIVIDADES

Questões

- 1) O desacordo entre observação e teoria foi bastante para resolver definitivamente a disputa entre o sistema geocêntrico e o heliocêntrico?
- 2) Que importância teve a tecnologia nos trabalhos científicos de Galileu?
- 3) Quais foram as observações de Galileu que diferiam do modelo de Ptolomeu e sustentavam o modelo copernicano?
- 4) Por que se deveriam preferir as observações com a luneta às feitas a olho nu?
- 5) Qual a relação entre entender o fato da bola abandonada do alto de uma torre cair no pé da mesma e a disputa entre os sistemas geocêntrico e heliocêntrico?
- 6) Quais foram as contribuições de Galileu para a ciência do movimento?
- 7) Por que as contribuições de Galileu foram mais eficientes do que as de Copérnico para rebater as críticas ao heliocentrismo?

Projetos

1. Pesquisar a experiência pensada de Galileu que explica seu conceito de inércia, e fazer uma maquete da mesma.

2. PARA SABER MAIS. No contexto da teoria heliocêntrica, defendida por Galileu, solicite que seus alunos procurem argumentos para responder: *como se resolvem as disputas em ciência?*

3. Promova um debate com seus alunos sobre o filme *Galileo Galilei*, cujas informações seguem abaixo. Atente para aspectos que levantam mitos sobre a ciência dos alunos.

Título no Brasil: Galileu

Título Original: Galileo Galilei

País de Origem: EUA

Gênero: Animação

Tempo de Duração: 60 minutos

Ano de Lançamento: 2001

Site Oficial: Estúdio/Distrib.: Imagem Filmes

Direção: [Richard Rich](#)

TEXTO 6 – Unindo Céu e Terra: a síntese de Newton

- A CIÊNCIA DEPENDE DE EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS (1)
- LEIS E TEORIAS EXERCEM FUNÇÕES DIFERENTES NA CIÊNCIA (3)
- A CIÊNCIA COMO BUSCA DE EXPLICAÇÕES (4)
- O CONHECIMENTO CIENTÍFICO É PARCIMONIOSO (5)
- O CONHECIMENTO CIENTÍFICO TEM UM CARÁTER PROVISÓRIO (6)
- A CRIATIVIDADE É UMA CARACTERÍSTICA ESSENCIAL DA CIÊNCIA (9)

O abandono da idéia de que os corpos celestes eram feitos de uma substância perfeita com a propriedade de realizar movimento circular uniforme colocou a questão de que causa estaria por trás de seus movimentos. Galileu não propôs nada a esse respeito. Como já foi dito antes, Kepler deu uma sugestão correta em alguns sentidos (ligando os planetas ao Sol e supondo que a ação decresce com o quadrado da distância), mas errada em outros (só atuar no plano das órbitas e ter origem magnética). Contudo, a solução do problema só viria com o trabalho do físico e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727).

COMO NEWTON CHEGA A LEI DE GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Quando Newton atacou o problema da Gravitação Universal, a compreensão dos movimentos no céu e na Terra já havia avançado em relação ao sistema de Aristóteles e Ptolomeu. Havia os trabalhos de Huygens (1629-1695) sobre os movimentos circulares usando o conceito de força centrípeta, as leis de Kepler indicando as trajetórias e regularidades nos movimentos dos planetas e a idéia de inércia, esboçada por Galileu e aperfeiçoada pelo próprio Newton e constituindo sua primeira lei de movimento. Já havia também mais duas leis de movimento estabelecidas por Newton. Tudo isso teve importância na construção de uma teoria de Gravitação Universal.

4

6

Vamos apresentar agora, de forma sucinta e simplificada, o raciocínio de Newton:

- 1) Como as excentricidades das órbitas planetárias são muito pequenas, Newton tratou do caso ideal de uma órbita circular.
- 2) Planetas e suas luas não estão em equilíbrio, pois neste caso teriam que realizar movimentos retilíneos uniformes. Como suas trajetórias são curvilíneas, tem que haver uma resultante não nula.
- 3) Para ser consistente com as órbitas elípticas e com a propriedade de varrer áreas iguais em tempos iguais (1ª e 2ª Leis de Kepler) essa força resultante tem que apontar constantemente para o centro da órbita.
- 4) Newton demonstrou que para seguir órbitas elípticas a força centrípeta atuando sobre o planeta ou satélite deve variar com o inverso do quadrado da distância, isto é, $F = C/D^2$, onde C = constante e D = distância entre o corpo em órbita e o corpo atrator. Assim, ele mostrou que sob a ação de uma força deste tipo qualquer corpo em órbita obedeceria à terceira Lei de Kepler ($T^2/D^3 =$ constante).

5) Newton sugeriu que a força que mantém os planetas girando em torno do Sol e as luas em torno de seus planetas é de mesma natureza da atração que a Terra exerce sobre todos os corpos em sua superfície e que é responsável pela queda deles quando abandonados. À semelhança de Kepler, que imaginou ser uma força magnética que mantinha os planetas em orbitas em torno do sol, Newton propôs uma força que chamou de gravitacional e que dependeria das massas dos dois corpos: planeta e sol. Algum tempo antes esta proposição unificando as leis que explicariam o movimento nos céus e na Terra seria considerada uma heresia. Esta conjectura não derivou de forma alguma dos dados empíricos, foi fruto da imaginação e criatividade de Newton.

9

6) Para testar sua hipótese, Newton compara a queda de uma maçã com a “queda da Lua”, isto é, o quanto a Lua se afasta de sua trajetória em linha reta. A distância da maçã ao centro da Terra é de um raio terrestre e a distância da Lua ao centro da Terra é de 60 raios terrestres. Com isso, num dado intervalo de tempo, se uma maçã na superfície da Terra cai de uma distância x , um corpo submetido à mesma força gravitacional, mas 60 vezes mais distante, deve cair $x/3600$ já que a força varia com o quadrado da distância. Newton fez esse cálculo e, de fato, encontrou que os valores concordam muito bem.

1

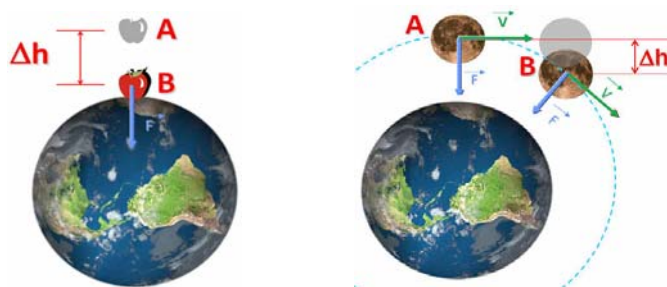


Figura 18 – Comparação da queda da maçã com a “queda da Lua”, submetidas à ação de uma atração gravitacional da Terra.

A TEORIA DE GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

A Teoria de Gravitação Universal consiste na hipótese de que todos os corpos, devido à sua massa, exercem forças atrativas uns sobre os outros. Essa teoria possibilitou Newton derivar sua Lei de Gravitação Universal. A partir dessa Lei e de suas três Leis de Movimento, Newton pode deduzir tanto as Leis de Kepler sobre os movimentos dos planetas, como as Leis de queda de Galileu. Isto mostra o incrível poder interpretativo da síntese Newtoniana, as Leis de Kepler e Galileu, aparentemente desconexas e tratando de fenômenos inteiramente diversos, passa a ser vistas como consequências naturais de uma Teoria única. Finalmente, a dicotomia Aristotélica entre céu e Terra havia sido superada. A Mecânica de Newton é igualmente aplicável a ambos. Com isso Newton realiza um dos ideais da ciência – a unificação.

3

5

Além de seu poder interpretativo e unificador, a teoria de Newton apresentou outra característica importante para a ciência – seu poder preditivo. A partir de seus princípios e leis gerais, podem-se deduzir consequências empiricamente observáveis. Este confronto entre as predições de uma teoria e os resultados de observações e experimentos constitui um importante teste das mesmas. No próprio livro em que publicou sua teoria nos Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. Newton faz algumas destas deduções. Apenas para citar algumas notáveis, Newton previu a

possibilidade de se lançarem satélites artificiais (figura 19) e deu as primeiras explicações satisfatórias para o fenômeno das marés e da precessão dos equinócios (quer dizer que a Terra gira como um pião; ela gira em torno de seu eixo e seu eixo também gira). Outros resultados importantes, deduzidos da Teoria de Newton foram: a descoberta de Netuno (previsto em cálculos antes de ser visto), as determinações das massas da Terra e do Sol, a medida da velocidade da Luz através dos satélites de Júpiter.

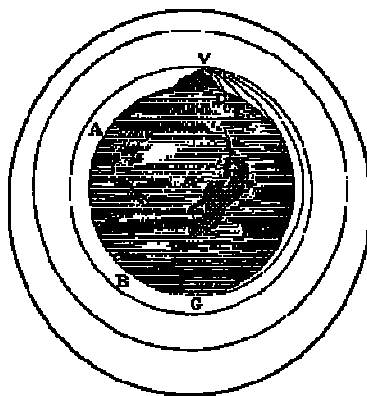


Figura 19 – Desenho de Newton em que ele prevê a possibilidade de se lançarem satélites artificiais.

O sucesso da aplicação da Teoria de Newton aos fenômenos observados na natureza foi tão grande que ela passou a ser uma espécie de modelo do que é ciência e como se faz ciência. Contudo, ela também tem os seus limites. A rotação do periélio do planeta Mercúrio e o desvio sofrido pela luz de uma estrela ao passar perto do Sol são mais precisamente descritos pela Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein (1879-1955), considerada atualmente a melhor explicação para os fenômenos envolvendo a Gravidade. Mesmo assim, para uma ampla gama de situações, a Teoria de Newton continua fornecendo resultados plenamente satisfatórios.

6

ATIVIDADES

Questões

- 1) De que forma o trabalho de Newton se relaciona com os trabalhos de Kepler e Galileu?
- 2) Discuta a aplicação dos termos lei e teoria no texto acima.
- 3) Discuta o ideal de generalização da ciência com base no exemplo da teoria de gravitação e na mecânica de Newton.
- 4) Quando Galileu observou a lua através da luneta, percebeu que ela era mais parecida com a Terra do que com uma esfera perfeita. Foi o primeiro passo para unificar a Terra e os Céus. Como Newton completou este processo? Qual o papel da teoria e qual o papel da evidência empírica nessa história?
- 5) O que o método de Newton tem de comum e no que ele se distingue dos métodos de seus predecessores?
- 6) Qual o papel da criatividade no trabalho de Newton?
- 7) A capacidade de fazer previsões a partir da teoria de gravitação levou Newton a fazer previsões muito modernas. Cite algumas.

Projetos

1. Henry Cavendish foi o primeiro cientista a determinar experimentalmente o valor da constante da gravitação universal. Solicite aos seus alunos que procurem informações sobre o experimento feito por Cavendish. É certo que uma procura cuidadosa no *You Tube* poderá permitir uma interessante discussão dos resultados.
2. Pesquisar sobre a física envolvida no lançamento e órbita dos satélites artificiais.
3. Pesquisar sobre o desenvolvimento das teorias sobre as marés, com destaque para a explicação de Newton.

UMA REFLEXÃO SOBRE A CIÊNCIA E SUA NATUREZA NA SALA DE AULA.

Há quem pense que quando a ciência explicou o brilho das estrelas estava, de certa forma, tirando um pouco de seu encanto, de sua beleza. Há quem enxergue beleza no processo pelo qual a luz é produzida nas estrelas. Para o homem medieval a lua era uma esfera perfeita, lisa, polida, feita de uma substância só presente nos céus. Para o homem de hoje ela é cheia de crateras, montanhas e imperfeições, feita dos mesmos elementos presentes na Terra. Seria a lua mais bonita na Idade Média? Hoje sabemos que a Lua ajuda a regular os movimentos da Terra, tem grande influência nas marés e reflete luz polarizada para nós. Teria esse conhecimento o poder de diminuir nossa capacidade de nos extasiarmos diante de uma noite de lua cheia? Minha resposta enfática é NÃO! Conhecer a natureza faz com que apreciemos sua beleza além do que pode ser visto, apreciamos sua ordem, a harmonia por trás dos fenômenos.

Do mesmo modo há quem pense que a ciência deve ser vista como uma verdade construída por gênios através de métodos claros, seguros e inquestionáveis, um conjunto de conhecimentos que cresce linearmente por acumulação. Os que questionam esta visão de ciência são tidos como seus inimigos, cuja finalidade seria enfraquecê-la diante das novas gerações. Mas, seria a ciência essa atividade fria e algorítmica, isenta de subjetividades, dúvidas e preconceitos? Não, a ciência é uma atividade humana e como tal compartilha das limitações daqueles que a produzem. Desvendá-la para nossos alunos, retirá-la de cima de um falso pedestal de infalibilidade, e mostrar suas diversas idas e vindas, construções e reconstruções, faz dela uma atividade menos interessante? Tira sua credibilidade? A confiança na ciência não pode se basear numa visão ingênua e equivocada. Apesar de todas as suas limitações, a ciência produziu e produz resultados verdadeiramente extraordinários e úteis. É o que de melhor o homem inventou para conhecer o mundo em que vivemos.

Apresentá-la tal qual é, ao invés de uma imagem caricata e artificial levará, certamente, a uma visão crítica a respeito de suas possibilidades e resultados. Por outro lado, será vista também, como uma atividade mais humana, que depende da criatividade e de nossas concepções de mundo, que interage com a sociedade, sofrendo a influência de seu tempo e influenciando-o. Por isso esse material foi escrito, para que o aluno aprenda ciência e *sobre* a ciência.

O presente texto foi concebido com a intenção de ser utilizado em sala de aula por professores e alunos. Contudo, seu maior objetivo é estimular os professores de física a incluírem elementos de NdC em suas aulas. Se esse material lhes parecer adequado, poderá ser utilizado para leitura e discussão com os alunos. Se, por alguma razão, o professor julgar que este material não está adequado para o uso direto com os alunos, poderá servir-se dele como subsídio para a construção de seu próprio material.

As possibilidades de uso são várias, e as relações da Física com a NdC não se restringem à Gravitação Universal e à lista de características apresentadas no item 1.3 deste Caderno. Apesar de ter sido escrito com a intenção de ser utilizado em sala de aula, outra intenção deste material era servir de exemplo de como a história da ciência e os conteúdos de ciência do ensino médio podem ser aproximados para favorecer a construção de uma imagem de ciência que corresponda melhor a essa importante atividade humana. O primeiro passo está dado, os caminhos são vários, só não se pode ficar parado. Que este material seja fermento de mudança para uma educação que atenda cada vez melhor às necessidades de um mundo que não pode abrir mão de um ensino de qualidade.

Bibliografia

[Aguiar, Gama & Costa 2006] C. E. M. Aguiar; E. A. Gama e S. M. Costa. Física no Ensino Médio. In: SECRETARIA DE ESTADO DE EDUCAÇÃO, RJ, *Livro II: Sucesso escolar: Reorientação curricular, Ciências da natureza e matemática*, RJ, 2006.

[Brasil 1999] Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio. Brasília: MEC; SEMTEC, 1999.

[Einstein & Infeld 1988] A. Einstein e L. Infeld. A Evolução da Física. Rio de Janeiro: Guanabara Coogan, 1988.

[Martins 2001] R. A. Martins. Como não escrever sobre história da física – um manifesto historiográfico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.23, n.1, março de 2001.

[Matthews 1994] M. R. Matthews. *Science Teaching – The role of history and philosophy of science*. London, Routledge, 1994.

[McComas, Clough & Almazroa 1998] W. F. McComas, M. P. Clough & H. Almazroa. The role and character of the nature of science in science education. In: W. F. McComas (Ed.). *The nature of science in science education: rationales and strategies*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p. 3-39, 1998.

[Zanetic 1989] J. Zanetic. Física Também é Cultura, *Tese de doutorado*, FEUSP, São Paulo. 1989.

Utilizada para o desenvolvimento dos textos históricos

CHALMERS, A. F., *O que é a ciência afinal?* SP. Editora Brasiliense, 1997.

CROMER, A., *Senso incomum, a natureza herética da ciência*. RJ, UniverCidade Editora, 1997.

COHEN, I. B. *O nascimento de uma nova ciência*, SP, EDART, 1997.

DERRY, G. N., *What science is and how it works*, Princeton, Princeton University Press, 1999.

NUSSENZVEIG, H. M., *Mecânica*, v.1, SP, Ed. E. Blücher, 2008.

PROJETO FÍSICA, UNIDADE 2 – Movimento nos céus, Fundação Calouste Gubelkian, Lisboa, 1978.