

Introdução: História da Física - Mecânica

Maurício Pietrocola

1 Introdução

O sucesso da Física como área de conhecimento se deve em grande parte ao fato de ter desenvolvido meios seguros de tratar questões que acompanhavam o homem desde a antiguidade. O movimento dos corpos no céu, que já eram abordados pelos filósofos naturais desde antes da civilização grega, ganharam uma representação extremamente consistente e completa com a publicação do *Principia* de **Isaac Newton** (1643-1727), em 1687. Reunindo as observações experimentais disponíveis através de um sistema matematizado de conceitos, leis e princípios, a **teoria newtoniana** se mostrou um instrumento intelectual muito potente, tendo permitido não apenas explicar, mas também prever eventos celestes importantes, tais como a **libração**² da Lua e a descoberta de planetas como Netuno e Urano.

O problema existente na época de Newton era como obter uma explicação dinâmica para o funcionamento do sistema solar (heliocêntrico). Proposto no século XVI por Nicolau Copérnico, o **sistema heliocêntrico** (onde os planetas giram em torno do Sol) continha ainda vários questões, tais como:

- O que faz com que a Terra e os demais planetas permaneçam em órbita ao redor do Sol?
- Por que a Lua acompanha a Terra no seu movimento pelo espaço?
- Por que ao lançarmos um objeto para cima ele ainda cai na nossa mão apesar de estarmos nos movendo em alta velocidade com a Terra?

²A *libração* da Lua deve-se ao fato de seu período de rotação ser idêntico ao período de translação em torno da Terra. Esse fato faz com que, da Terra, sempre se observe a mesma região da Lua e haja uma “face oculta”. A libração da Lua foi explicada dentro do contexto da Mecânica newtoniana por Joseph-Louis Lagrange no século XVIII.

³Fenômeno da paralaxe, medido em 1838 por Friedrich Wilhelm Bessel.

- Se a Terra se move no espaço, por que não se observa variações na posição das estrelas?³

A grande contribuição de Isaac Newton nesse contexto foi responder de maneira quase definitiva a essas e outras questões manifestadas pelos críticos do heliocentrismo, além de fornecer um quadro conceitual para pesquisas posteriores. Associando três leis dinâmicas com uma lei sobre a atração entre os corpos (a Gravitação Universal), ele mostrou que praticamente todos os problemas poderiam ser resolvidos.

Antes de apresentarmos a contribuição de Newton e outros cientistas modernos para o estudo do sistema solar, apresentaremos um pouco do **sistema geocêntrico** (onde a Terra é o centro do Universo), proposto na antigüidade grega e que permaneceu aceito até o século XVI. O leitor poderia perguntar: qual o interesse em estudar uma explicação do Universo já ultrapassada? Isto pode ser interessante, se através dela pudermos entender a trajetória histórica que leva à nossa ciência. As explicações dadas pelos gregos interessam, pois elas inauguraram uma nova forma de pensar sobre os movimentos de corpos observados no universo. Ao olharem o céu não viram nele um palco para suas divindades. Desta forma, puderam pensar sobre o funcionamento interno do Universo.

2 O universo geocêntrico

Entendendo o movimento no céu

Se numa noite nos dispusermos a passar muito tempo observando as estrelas, veremos que a grande maioria delas descreve arcos no céu. Com o Sol e a

Lua ocorre o mesmo. Imaginar que elas *circulam* a Terra para explicar o que observamos, não é uma tarefa muito árdua. Ainda mais se a *perfeição* do círculo fizer parte de suas crenças. Foi assim que na Grécia antiga surgiram várias representações do universo compostas por astros em movimento circulando em torno da Terra. Uma das mais importantes foi proposta por **Platão**⁴ no século IV a.C. O seu “**universo de duas esferas**” consistia basicamente de um sistema de esferas cristalinas concêntricas que giravam cada qual num eixo e numa rotação diferentes em relação à Terra fixa no centro. A esfera mais exterior representava as estrelas e a interior o Sol.

Mais tarde **Aristóteles** (Figura 1), um dos mais brilhantes discípulos de Platão, no século IV a.C., e principalmente **Ptolomeu** (Figura 2), no século II d.C., aperfeiçoaram esse sistema cosmológico, inserindo outras esferas, Figura 3, detalhando as propriedades das substâncias e discutindo o comportamento dos corpos no céu e na superfície terrestre.



Figura 1: Aristóteles (384–322 a.C.), nascido em Estagira, Grécia, filósofo, aluno de Platão. É considerado um dos maiores pensadores de todos os tempos e criador do pensamento lógico. Teve várias contribuições na política, física, metafísica, poesia, biologia, entre outras. (Imagem: University of California)

⁴Platão de Atenas (428/27 a.C. – 347 a.C.) foi um filósofo grego, discípulo de Sócrates e mestre de Aristóteles. Destacou-se em várias áreas como política, metafísica e ética.



Figura 2: Claudius Ptolemaeus, ou Ptolomeu, (83-161) matemático, astrônomo e geógrafo grego. Trabalhou em um observatório no topo de uma igreja em Alexandria, Egito (Imagem: The Galileo Project)

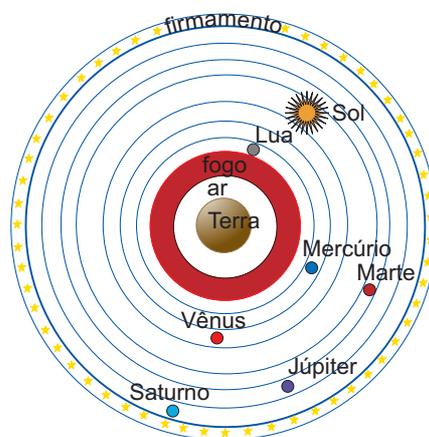


Figura 3: Modelo cosmológico simplificado de Aristóteles. A Terra ocupava o centro do universo e os 4 elementos da natureza ocupavam o espaço sublunar. As esferas estavam embutidas umas nas outras, sendo que a mais externa era a que continha as estrelas e cada vez mais para o interior estariam as estrelas errantes (ou planetas), o Sol e a Lua. O Universo grego era finito - nada existia para além da esfera das estrelas.

O sistema geocêntrico proposto na Antiguidade grega fornecia respostas a questões que intrigavam os homens desde muito tempo, sem a inclusão de divindades. Neste modelo cosmológico, representado na Fi-

gura 3, a variação do caminho percorrido pelo Sol entre inverno e verão podia ser explicada. Na verdade, as duas esferas eram concêntricas como uma cebola, mas não giravam da mesma forma uma em relação à outra. Isto podia explicar tanto a variação de altura do Sol ao longo do ano, como a variação da duração entre dia e noite.

O movimento dos planetas era algo mais complicado a ser explicado. Ao serem observados no céu ao longo de semanas ou meses, os planetas descreviam movimentos estranhos, com formação de laços, como ilustrado na Figura 4. Para dar conta deste tipo de movimento, era necessária uma combinação de movimentos circulares. Para isto, os gregos faziam várias combinações de esferas concêntricas, mas com velocidades e eixos de rotação diferentes. Para explicar o movimento do planeta Saturno, Eudoxo de Cnidos (408 a.C.–355 a.C.), um aluno de Platão, estabeleceu que seria necessária a combinação de 26 movimentos uniformes (vinte e seis esferas). Aristóteles acrescentou mais três movimentos à proposta e chegou à conclusão de que 29 movimentos eram necessários para melhor explicar o que se observava no céu.



Figura 4: A trajetória dos planetas forma um laço no céu (em relação às estrelas distantes). O planeta adianta ao longo de várias noites no céu para em seguida voltar (retrogradação) e novamente avançar em relação às estrelas. Estas últimas mantêm aparentemente seu movimento circular uniforme.

O sistema desenvolvido posteriormente por Ptolomeu utilizava círculos (epiciclos) e não esferas cristalinas para representar o movimento dos astros, Figura 5a. Seu sistema era um pouco mais simples, mas implicava em aceitar que tais círculos não seriam materiais, pois de outro modo se chocariam no céu. A Figura 5b mostra como os laços são formados considerando a explicação atual (sistema heliocêntrico) para o movimento dos planetas.

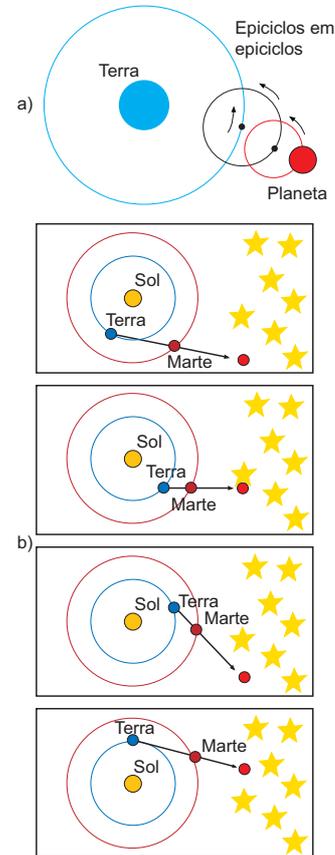


Figura 5: (a) Representação do movimento de um planeta na perspectiva ptolomaica. Veja que é possível que o planeta se mova ora para trás ora para frente, em função da combinação dos três movimentos de rotação. (b) Explicação da origem dos laços do planeta Marte, considerando o movimento heliocêntrico. Observe que a posição aparente do planeta retrocede (entre a segunda e terceira figura), embora tanto a Terra como Marte continuem seus movimentos de rotação em torno do Sol.

A “Física” Aristotélica

Os gregos da antiguidade não se limitavam apenas a fornecer explicação sobre o que viam nos céus. Na estrutura idealizada por Aristóteles, os movimentos de objetos terrestres também eram explicados. Mas o que valia para os céus não valia para os objetos na Terra. Os céus eram o local da *perfeição* e por isto representados através de formas consideradas perfeitas, como o círculo e a esfera. Já a Terra era o lugar da *corrupção*, e aqui nada poderia ser perfeito e duradouro. A esfera determinada pela órbita da Lua era o limite entre as duas regiões do universo, sub-lunar e supra-lunar.

As leis que valiam para o mundo supra-lunar deter-

minavam uma ordem perfeita: *os corpos deviam se mover constantemente em trajetórias perfeitamente circulares*. Mas isto não valia para o mundo terrestre. Aqui havia também uma ordem, mas que estava longe de ser perfeita. Cada elemento ocupava um lugar natural: o elemento *terra* era próximo ao centro da Terra (centro do Universo); a *água* ocupava um lugar natural acima da terra; o *ar* acima da água e o *fogo* acima do ar. Esta era a ordem natural dos elementos. Mas esta ordem era constantemente perturbada. Por diversas razões, os corpos terrestres encontravam-se frequentemente fora de seus lugares naturais e a ordem era buscada incessantemente pelos elementos. Por exemplo, algumas vezes a água estava acima do ar e a chuva correspondia ao retorno da ordem, pois a água caía *buscando seu lugar natural*. Quando se lançava uma pedra para o alto, estava-se corrompendo a ordem natural e ela acabava por buscar seu lugar natural, caindo de volta para o solo. Assim, os elementos tendiam a buscar espontaneamente seus lugares naturais na ordem deste mundo. Quando assim procediam, estavam em movimento natural.

Mas havia também movimentos *violentos* ou *forçados*. Por exemplo, uma pedra ao ser lançada para cima, executava um movimento forçado por um agente externo. O movimento era violento, pois a obrigava a deixar seu lugar natural. O mesmo aconteceria no ato de empurrar uma carroça ladeira acima. A ação de alguém ou de algo forçaria movimentos não naturais.

Na forma de pensar dos gregos, a Terra deveria estar parada no centro do Universo, pois dali se viam os movimentos circulares perfeitos dos astros. O centro da Terra coincidia com o centro do Universo. Além deste argumento que poderia ser classificado como “estético”, os gregos possuíam bons argumentos contra a mobilidade da Terra, entre eles:

- As nuvens no céu se movem indiferentemente em todas as direções.
- Não há diferença entre lançar flechas e outros objetos para leste e para oeste.
- Não se percebe ventos fortes sobre a superfície terrestre causados pelo movimento da Terra.

Mas nem tudo eram “flores” no universo aristotélico! Embora engenhoso, ele continha problemas

⁵Esse efeito consistia no deslocamento de ar gerado inicialmente pela flecha/objeto lançado que geraria uma corrente de ar da frente para trás que continuaria a empurrá-la para cima. Com a progressão do movimento, a ação do ar enfraqueceria até desaparecer. Neste momento ele deixaria de subir e começaria a cair verticalmente.

⁶Aurélio Agostinho, ou Santo Agostinho, foi um bispo católico, teólogo e filósofo que nasceu em 13 de Novembro de 354 em Tagaste (hoje Souk-Ahras, na Argélia); morreu em 28 de Agosto de 430, em Hipona (hoje Annaba, na Argélia). É considerado pelos católicos santo e doutor da doutrina da Igreja.

⁷São Tomás de Aquino, (Roccasecca, 1225 – Fossanova, 7 de Março 1274) foi um frade dominicano e teólogo italiano. Foi o mais distinto expoente da Escolástica.

não resolvidos. Alguns deles reconhecidos pelo próprio autor. Vejamos um deles. Segundo a física aristotélica, ao se lançar um objeto para o alto, o movimento é forçado pela ação da mão de quem o lança. Mas, e depois que o objeto deixa a mão do lançador, qual é a ação que continua a movê-lo para o alto? Suponhamos que o corpo lançado seja uma flecha ou lança. Livre de ações, elas não deveriam buscar imediatamente seu lugar natural embaixo do ar? Aristóteles estava consciente deste problema e fez algumas hipóteses para tentar solucioná-lo. Uma delas foi a idéia da *antiperistasis*.⁵

3 A simbiose ciência grega e fé católica na idade média

Do ponto de vista atual, pode parecer absurdo que uma teoria estranha e bizarra tenha tido tanto sucesso e permanecido aceita por quase dois milênios. Para entender isso é preciso ter consciência de que estamos falando de idéias formuladas e avaliadas há muito tempo, numa época em que certamente os valores, necessidades, crenças e critérios das pessoas eram muito diferentes dos nossos. A concepção do Universo de Aristóteles atravessou barreiras geográficas e históricas. Ela se espalhou pela Europa, Oriente Médio, Ásia Menor, Norte da África, entre outros, e foi constantemente discutida e retocada nos séculos que se seguiram à sua proposição.

Na baixa Europa medieval, as primeiras críticas à concepção de mundo aristotélico partiram de membros do clero, que viam nos pensadores gregos e romanos rivais para a nova fé cristã. **Santo Agostinho**⁶ foi um pensador cristão importante e crítico feroz das idéias de Aristóteles e de outros filósofos naturais clássicos. Para ele, um bom cristão não deveria buscar explicações para os fenômenos naturais, pois a fé na grandeza de Deus deveria ser suficiente para se viver.

Os avanços da doutrina católico-cristã sobre a Europa tornaram seus defensores mais brandos em termos da aceitação das idéias do período clássico. A partir do século XI houve um movimento de adequação entre o mundo aristotélico e o mundo católico. Nesse contexto, destaca-se o papel de **São Thomas de Aquino**⁷, um dos principais pensadores cristãos na conciliação entre os dois sistemas de crenças. No final da Idade Média,

o mundo aristotélico era a base do mundo católico. A simbiose entre ambas foi resultado desse processo de conciliação.

4 Copérnico e o sistema Heliocêntrico

A continuidade no estudo e exploração das idéias de Aristóteles permitiu avanços na física e astronomia medievais. Alguns aspectos da física terrestre aristotélica foram tratados por pensadores medievais. Por exemplo, os problemas na interpretação dos lançamentos oblíquos foram tratados já por **João Filopono** (490 – 566) no século VI. Ele propôs a idéia de que na ação de lançar um corpo, uma *força impressa* ficaria impregnada no mesmo, permitindo explicar por que uma flecha continua seu movimento ascendente mesmo depois de ter se separado do arco. A diminuição dessa força impressa explicaria o encurvamento da trajetória e o retorno do corpo ao solo. Muito tempo depois, no século XIV, esse mesmo problema foi tratado por **Jean Buridan**⁸ e **Nicole Oresme**,⁹ gerando o conceito de **Impetus**.

O sistema heliocêntrico

No campo da astronomia, o investimento nos sistemas de cosmologia aristotélico-ptolomaico permitiu tratar em detalhes as órbitas dos vários planetas. Os avanços nas técnicas de cálculo e nas observações celestes forneciam mais informações sobre a trajetória de estrelas e planetas. No entanto, as tentativas de corrigir as discrepâncias entre o que se via no céu e aquilo que era previsto pelo sistema aristotélico ao longo dos séculos tinha tornado o sistema muito complexo. Desde a antiguidade os astrônomos vinham aumentando o número de esferas/círculos (os ditos epiciclos) e introduzindo vários recursos geométricos “artificiais”, como “excêntricos” e “deferentes”, usados na descrição da trajetória dos planetas¹⁰. No início do Renascimento, o universo produzido a partir da idéia original de Platão tornava-se muito complexo e confuso.

O Renascimento trouxe consigo um maior acesso aos pensadores clássicos e uma maior liberdade na

avaliação das dificuldades em se aplicar as idéias de Aristóteles aos movimentos dos astros e dos corpos terrestres. Inicialmente, os pensadores renascentistas acreditavam que os problemas existentes na concepção do mundo aristotélico eram devidos à falta de livros e documentos originais do período clássico. A introdução na Europa de traduções árabes e de originais gregos perdidos, permitiu a redescoberta de vários trabalhos nas diversas áreas de conhecimento. Aos poucos, diminuiu a esperança de que existiriam trabalhos gregos perdidos com as soluções para os problemas detectados no universo aristotélico. Nesse contexto, não é de se surpreender que uma nova concepção de mundo viesse a ser proposta. No entanto, a dificuldade em aceitar e propor mudanças radicais no universo aristotélico residia no fato de que isso também abalaria a concepção de universo sustentada pela Igreja Católica.

A contribuição de **Nicolau Copérnico** (1473–1543, Figura 6) na evolução da concepção cosmológica do Universo foi feita nesse contexto. Influenciado por idéias platônicas sobre a beleza e a perfeição do mundo e por alguns autores que buscavam valorizar mais o papel do Sol no Universo, devido à sua importância para a vida dos seres humanos, Copérnico propôs um sistema no qual o Sol ocuparia o centro do Universo. Ao estudar longamente o sistema geocêntrico e seus problemas, ele escreveu um livro intitulado “De Revolutionibus”¹¹, onde apresentava argumentos a favor de um sistema no qual o Sol ocupava o centro do Universo.

⁸Jean Buridan, em Latim Joannes Buridanus (1300 - 1358), foi um filósofo e religioso francês. Foi um dos mais famosos e influentes filósofos da Idade Média tardia.

⁹Nicole d' Oresme, Nicole Oresme, ou Nicolas de Oresme (1323 – 1382) foi um destacado intelectual e provavelmente o pensador mais original do século 14. Economista, matemático, físico, astrônomo, filósofo, psicólogo, e musicólogo; foi também um teólogo dedicado e Bispo de Lisieux, tradutor, conselheiro do rei Carlos V da França.

¹⁰Para maiores detalhes, veja Thomas Kuhn, *A estrutura das revoluções científicas*, 7ª ed., São Paulo: Perspectiva, 2003.

¹¹Uma boa tradução comentada do livro de Copérnico foi feita por R. A. Martins, em “Commentariolus – Pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes - Introdução”, tradução e notas. 2ª ed., São Paulo: Livraria da Física, 2003.

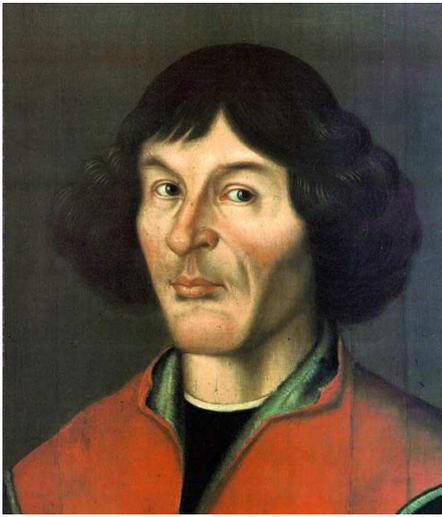


Figura 6: Nicolau Copérnico (Toruń, 19 de Fevereiro de 1473 – Frauenburgo, 24 de Maio de 1543) foi astrônomo e matemático polonês. Foi também cônego da Igreja, governador e administrador, jurista, astrólogo e médico (Imagem: Museu Nicolau Copérnico de Frombork)

Na ciência, as idéias não mudam de forma abrupta. Muito menos aquelas relacionadas à estrutura do Universo. O livro de Copérnico com suas idéias, publicado em 1543, não foi imediatamente aceito. Ao contrário, a maioria de seus contemporâneos se mantinha fiel às idéias aristotélicas. Eles talvez estivessem dispostos a pequenas modificações, mas não estavam preparados para colocar a Terra em movimento. É importante dizer que não se tratava de “má vontade”. Havia algumas boas razões para não considerar a Terra em movimento, como descrevemos anteriormente. Copérnico conhecia boa parte desses argumentos e não tinha boas respostas para todos os problemas existentes. Não por falta de empenho ou capacidade, mas por que na ciência muitas perguntas não podem ser respondidas no campo das velhas idéias! Foram necessários cem anos para que a revolução iniciada por Copérnico se concluísse com Kepler, Galileu e Newton.

A consolidação do sistema heliocêntrico

Uma análise retrospectiva e sem o devido recuo histórico, pode sugerir que bastou Copérnico propor um sistema com o Sol no centro, para que todos os problemas da época tivessem acabado. Teria sido apenas conservadorismo o que impediu seus contemporâneos de apreciar as qualidades do sistema heliocêntrico? Com certeza não. Na época de sua publicação (1543), o sistema de Copérnico não oferecia uma descrição global

dos céus melhor do que aquela derivada de Aristóteles e Ptolomeu. Embora tivesse resolvido conceitualmente problemas importantes, como o movimento retrógrado dos planetas, a proposição da Terra em movimento trazia outros tantos. O grande problema era que as órbitas dos planetas propostas por Copérnico continuavam circulares e isto mantinha a exigência de se combinar movimentos circulares para dar conta da descrição exata das órbitas planetárias. Para superar esse problema, duas contribuições foram fundamentais: melhorar a precisão nas medidas das posições dos planetas e buscar a melhor forma de representar as órbitas dos planetas.

A primeira tarefa foi realizada pelo astrônomo dinamarquês, **Tycho Brahe** (1546-1601, Figura 7), que durante mais de 20 anos observou a trajetória dos planetas no céu. Ele foi capaz de aumentar em muito a precisão dos dados observacionais da época, obtidos por Ptolomeu, que durante muitos séculos se manteve como os dados mais precisos. Ao desenvolver uma série de instrumentos de medida, ele foi capaz de isolar erros sistemáticos nas medidas, assim como a influência de fatores fortuitos, como o vento. Embora dispusesse de dados muito precisos, Tycho não foi capaz de desenvolver uma apresentação adequada para o movimento dos planetas. Em parte, isso ocorreu pela sua relutância em abandonar a parte da herança aristotélica. Para ele, a Terra não poderia abandonar o centro do universo como propunha Copérnico.



Figura 7: Tycho Brahe (1546-1601), astrônomo dinamarquês, desenvolveu seus trabalhos em um observatório na ilha de Ven, entre a Dinamarca e a Suécia (Imagem: The Galileo Project)



Figura 8: Johannes Kepler (nasceu em Weil der Stadt, hoje na Alemanha, 27 de dezembro de 1571 – faleceu em Ratisbona, 15 de novembro de 1630). Kepler foi astrônomo e matemático. Formulou as três leis fundamentais do movimento planetário, hoje conhecidas como leis de Kepler (ver capítulo 11). Descobriu que os planetas descrevem órbitas elípticas em torno do Sol. (Imagem: The Galileo Project).

A segunda contribuição foi dada por **Johannes Kepler** (1571-1630, Figura 8). Ele foi recebido como assistente de Tycho e após sua morte, pôde utilizar as precisas observações por ele realizadas. A grande contribuição de Kepler foi introduzir, depois de muito resistir a isso, as órbitas elípticas para descrever a trajetória dos planetas. Esta mudança permitiu que o sistema heliocêntrico se tornasse simples na explicação do movimento dos planetas. No seu modelo, cada planeta realiza uma única trajetória elíptica em torno do Sol. Os movimentos vistos no céu são uma combinação do movimento dos planetas com o movimento da própria Terra.

¹²Essas leis serão estudadas no capítulo 11 deste livro.

Kepler obteve três leis básicas relacionadas ao movimento dos planetas.¹² Ele é considerado um dos primeiros cientistas genuinamente moderno. Para ele, o Universo não deveria ser explicado através da introdução de características divinas, como acreditavam os pensadores medievais, mas como uma máquina auto-suficiente. Ele deixa isto claro numa carta a Hewart de 1605, onde dizia:

“Tenho me ocupado muito na investigação das causas físicas. Minha intenção tem sido demonstrar que a máquina celeste tem que se comportar não como um organismo divino, senão como uma obra de relojoaria... [onde] seus movimentos [são causados] por um simples peso.”

Observe, que o relógio, na época uma invenção recente, é a analogia utilizada por Kepler para combater a visão divina do Universo Medieval. O mecanismo interno do relógio explica tudo o que se observa no seu exterior.

Outro cientista que deu contribuições fundamentais para o nascimento da ciência moderna foi **Galileu Galilei** (1564-1642, Figura 9). No campo da mecânica celeste, sua principal contribuição na consolidação das idéias de Copérnico foi mostrar falhas na concepção de mundo aristotélico. Ao tomar conhecimento de um instrumento inventado nos países baixos, que servia para aproximar os objetos, Galileu reuniu informações sobre seu funcionamento e construiu seu próprio telescópio com duas lentes. Ao fazer uso do mesmo para observar o céu, Galileu deparou-se com observações inusitadas que contradiziam características e propriedades do universo geocêntrico.

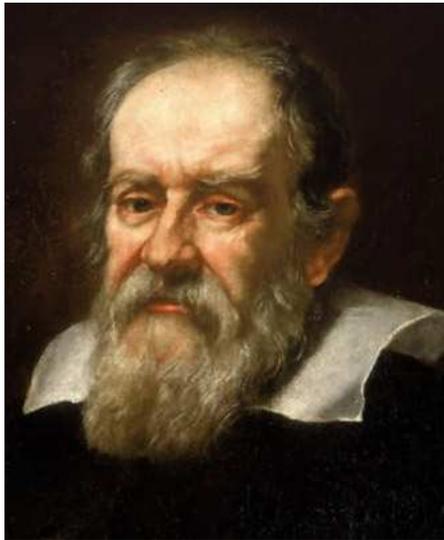


Figura 9: Galileu Galilei (Pisa, 15 de fevereiro de 1564 – Florença, 8 de janeiro de 1642) físico, matemático e astrônomo. Realizou estudos sistemáticos sobre o movimento acelerado e sobre o princípio da inércia. Foi o primeiro astrônomo a utilizar um telescópio para observar planetas e satélites. (Imagem: Justus Sustermans)

Ao observar a superfície da Lua, Galileu observou manchas escuras, que atribuiu à existência de montanhas. A existência de montanhas contrariava um dos princípios básicos do universo aristotélico, pois a Lua deveria ser perfeita e como tal ter uma superfície perfeitamente lisa. Inclusive, com informações sobre a posição do Sol, chegou a estimar a altitude das supostas montanhas.

O uso do telescópio revelou também a existência de satélites em Júpiter. Essa observação indicava que poderia haver outros centros no Universo que não a

Terra. Ele também observou “fases” no planeta Vênus, Figura 10a, assim como na Lua. Isto só poderia ser admitido caso a Terra estivesse também em movimento, Figura 10b.

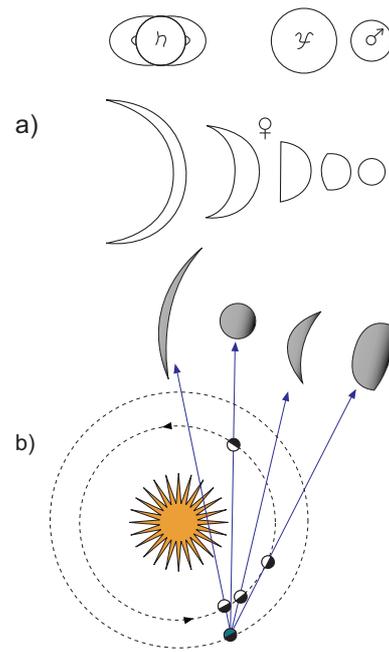


Figura 10: (a) Reprodução de um esboço de Galileu sobre as fases de Vênus e representação do seu movimento, (b) Explicação atual das fases de Vênus. Observe que o tamanho de Vênus varia com a distância da Terra.

As contribuições acima serviram para fortalecer o sistema heliocêntrico proposto por Copérnico. Talvez a contribuição mais importante de Galileu tenha sido a solução perspicaz que ele forneceu para justificar o movimento terrestre. Essa era uma das principais dificuldades no sistema heliocêntrico, pois a observação cotidiana e celeste parecia indicar que a Terra estaria em repouso. Galileu sabia que não dispunha de argumentos que pudessem sustentar o movimento terrestre. Ele não pôde rebater diretamente as previsões aristotélicas, porém foi capaz de mostrar que seria possível a Terra se mover no espaço ainda que não percebêssemos esse movimento. Isto ocorreria pelo fato do movimento comum não poder ser percebido. A argumentação dele foi feita em analogia com o que se passaria no interior de um barco que navegasse em águas tranquilas. Para alguém que estivesse trancado no interior do mesmo, tudo aconteceria de forma idêntica à situação do barco

¹³Um estudo detalhado desse aspecto da obra de Galileu pode ser melhor estudado em R. A. Martins, em “Commentariolus – Pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes - Introdução”, tradução e notas. 2a.

ancorado¹³. O extrato abaixo é parte do texto original de Galileu¹⁴:

“(...) No maior aposento existente sob a cobertura de um grande navio, fechavos com algum amigo e aí fazei haver moscas, mariposas e animaizinhos voadores semelhantes; tomai também um grande vaso com água com peixinhos dentro, adaptai também algum recipiente alto que vá gotejando em outro (...) e, estando parado o navio, observai cuidadosamente que aqueles animaizinhos voadores vão com igual velocidade para todos os lados do cômodo; vereis os peixes vagando indiferentemente para qualquer lado das bordas do vaso; os pingos cadentes entrarão todos no vaso colocado embaixo; e vós, ao jogar uma coisa a vosso amigo, não deveis jogá-la mais fortemente para aquele lado do que para este, quando as distâncias forem iguais; (...) Tendo observado bem todas essas coisas fizeti mover o navio com a velocidade que se queira; e (desde que o movimento seja uniforme e não flutuante daqui e dali) vós não reconhecereis a menor mudança em todas as coisas indicadas; nem por qualquer delas, nem por coisa alguma que esteja em vós, podereis assegurar-vos se o navio caminha ou está parado...”

5 A gravitação universal

Os trabalhos de Kepler e Galileu tinham permitido um avanço considerável no sistema copernicano. Muitos argumentos contrários ao movimento da Terra tinham sido anulados por Galileu, e Kepler tinha resolvido o problema da precisão do sistema heliocêntrico ao introduzir as órbitas elípticas. Mas ainda restava uma importante pergunta sem resposta:

O que faz os planetas girarem em torno do Sol?

Esta questão era complementada por outras do mesmo tipo:

- Por que a Lua gira em torno da Terra e não do Sol?
- Por que as “Luas” de Vênus fazem o mesmo em torno de Vênus?

edição. São Paulo: Livraria da Física, 2003

¹⁴Opere, 1843, págs. 100-3, apud Martins 1986, op. cit.

¹⁵Gilbert (1544-1603) ao estudar as propriedades elétricas e magnéticas da matéria, sugeriu que o poder necessário para manter os planetas em órbita poderia ser dessa natureza.

- Por que os corpos na superfície caem em direção ao centro da Terra?

Responder a estas perguntas era, na verdade, completar a revolução iniciada por Copérnico.

A força gravitacional

Muito antes de **Isaac Newton** (1643-1727, Figura 11), alguns pensadores já tinham proposto que seria necessária a existência de um “poder atrativo” no Sol para garantir o movimento dos planetas no seu entorno¹⁵. Este poder deveria existir em menor escala também na Terra para garantir a órbita da Lua. Mas qual seria este “poder atrativo”?

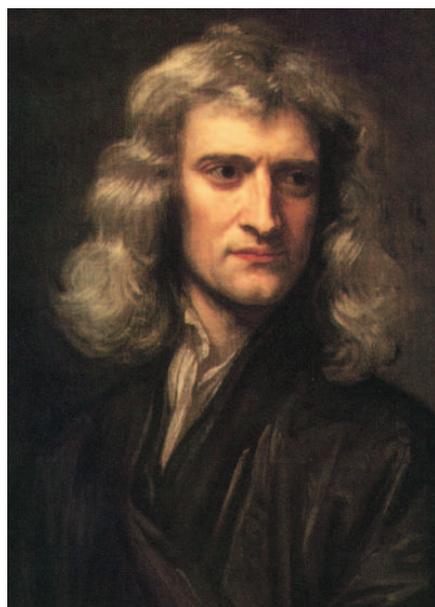


Figura 11: Isaac Newton (Woolsthorpe, 4 de Janeiro de 1643 - Londres, 31 de Março de 1727[1]). Um dos mais brilhantes físicos que a humanidade já conheceu. Foi também matemático, filósofo, químico, astrônomo e teólogo. (Imagem: Godfrey Kneller).

Depois de muito refletir e buscar respostas para esse problema, assim como vários outros cientistas de sua época, Newton propôs a existência de uma força agindo à distância entre os corpos. A esta força ele deu o nome

de **força gravitacional**¹⁶. Segundo ele, todos os corpos atraem-se por forças de origem gravitacional. A intensidade desta força entre dois corpos depende diretamente do produto das massas dos corpos e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles.¹⁷ Newton pôde explicar vários outros fenômenos como a órbita excêntrica dos planetas; a precessão do eixo da Terra; as marés, entre outros. Newton generalizou a ação da força gravitacional não apenas para objetos na Terra, mas para corpos celestes, como a atração entre o Sol e a Terra e os demais planetas e satélites. Desta forma, sua lei ficou conhecida como **Lei da Gravitação Universal**.

Não percebemos, mas estamos sendo atraídos por todos os objetos em nossa volta, como mesas, cadeiras, paredes. Não percebemos isto, pois em geral a força gravitacional é pequena devido ao pequeno valor da constante gravitacional, que aparece na equação da força gravitacional (ver capítulo 11). Sentimos a atração gravitacional da Terra, pois a sua grande massa compensa o pequeno valor desta constante. A atração gravitacional atua sempre nos dois corpos, com a mesma intensidade, direção e sentidos opostos. Ainda não se detectou nada capaz de bloquear a ação da gravidade. Se você se trancar num quarto com piso, teto e paredes de chumbo, ainda assim será atraído pela Terra. A força gravitacional age mesmo em distâncias muito grandes.

O conceito de força gravitacional permitiu explicar porque os planetas/satélites e outros corpos celestes permanecem em órbita. Esse conceito completou os pré-requisitos necessários para representar o universo numa perspectiva não-geocêntrica. A força gravitacional foi a primeira das quatro **interações** hoje conhecidas pela Física (além da gravitacional, são conhecidas a **força eletromagnética**, a **força forte** e a **força fraca**)¹⁸. Durante cerca de 150 anos a força gravitacional permaneceu como a única interação conhecida na natureza, sendo responsável, nesse período, pela origem de todos os fenômenos conhecidos.

O trabalho de Newton foi publicado no livro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), mais conhecido como **Principia**, considerado por muitos como o mais importante livro da história da ciência. Além da lei da gravitação este livro também descreve as três leis do movimento, conhecidas como as *Leis de Newton*, que são a base da mecânica clássica. Newton também compartilha com Gottfried Leibniz (ver próxima seção) o mérito do desenvolvimento do cálculo

diferencial e integral, entre outras importantes contribuições.

Origem histórica do Princípio de Conservação de Energia

A seção anterior teve por objetivo fornecer elementos sobre a evolução na forma de concepção do Universo, de um início mítico/mitológico até o começo do que passou a ser considerado como ciência moderna. O programa newtoniano com os conceitos de forças centrais, ação gravitacional, leis de movimento, além dos conceitos de espaço e tempo forneceu o cenário para o tratamento de vários fenômenos físicos. O século XVIII iria coroar esse modelo de ciência, com o aprofundamento dos estudos sobre a mecânica celeste e a aplicação dessas idéias a outros campos de pesquisas, como a óptica geométrica. A ciência newtoniana espalhou-se pela Europa e por outros continentes.

Nesse cenário, uma contribuição das mais importantes, foi a proposição dos **princípios de conservação**. Dentre eles destaca-se a idéia de que o movimento se conserva. Mesmo antes dos Gregos, podemos encontrar civilizações que se valeram de idéias de conservação para explicar alguns fenômenos. Na ciência propriamente dita, tudo parece ter começado com uma pergunta aparentemente simples: *De onde provém o movimento de um corpo?* Para **René Descartes** (1596 – 1650, Figura 12) todo movimento provém do movimento de outro corpo. Quando lançamos uma pedra, responsabilizamos o movimento de nosso braço por isto. Num jogo de bilhar, o movimento de uma bola gera o movimento das outras. Para ele, o universo deveria ser pensado como possuindo certa quantidade de movimento que se transfere entre os corpos do universo, permanecendo, no entanto constante ao longo dos tempos. Senão, como explicar que a Terra e os demais planetas continuam a se movimentar depois de bilhões de anos?

¹⁶A palavra gravitacional tem origem no termo grego *gravis*, cujo significado foi associado à propriedade dos grandes corpos. Força gravitacional pode ser entendida como a força própria dos *graves*.

¹⁷Este assunto será abordado com mais detalhes no capítulo 11.

¹⁸Veja no capítulo 6 mais detalhes sobre as interações fundamentais.



Figura 12: René Descartes (La Haye en Touraine, França, 31 de Março de 1596 – Estocolmo, Suécia, 11 de Fevereiro de 1650). Foi um físico, filósofo, e matemático. Ficou famoso por ter inventado o **sistema de coordenadas cartesiano** e considerado por muitos como o Pai da “matemática moderna” (Imagem: Musée du Louvre)

Embora inicialmente aceitável, na prática a idéia de que o movimento se conserva enfrenta alguns problemas. Quando lançamos uma esfera num piso horizontal, seu movimento vai diminuindo até parar. Para onde foi o movimento original da pedra? Descartes diria que se transferiu para as partículas do ar e do próprio piso, na forma de movimentos microscópicos, impossíveis de serem vistos pelos olhos. Com procedimentos deste tipo, Descartes escapava da maioria das situações onde o movimento parecia desaparecer. Para ele, a conservação do movimento era um princípio *inviolável*. Pode parecer estranho a crença na conservação do movimento nos dias de hoje. No século XVII, porém, ela era muito popular. O que desafiava os cientistas da época era determinar como esse movimento deveria ser medido.

Entre as várias maneiras de conceber a medida do movimento, a defendida por **Christiaan Huygens** (1629-1695, Figura 13) e **Gottfried Wilhelm von Leibnitz** (1646-1716, Figura 13) é particularmente interessante, pois se relaciona diretamente com uma das formas de energia hoje consideradas. Huygens mostrou que a grandeza $m.v$ (produto da massa pela velocidade do objeto) proposta por Descartes não poderia ser usada para quantificar o movimento. Para Huygens, a grandeza $m.v^2$ era uma forma melhor de determinar a “força”¹⁹.

¹⁹A palavra força empregada por Huygens não tinha o mesmo significado do conceito atual de força, que tem origem nos trabalhos de Newton. Até o século XIX, havia uma mistura entre os conceitos de força, potência e energia.



Figura 13: Christiaan Huygens (nasceu em Den Haag, Países Baixos, 14 de Abril de 1629 – faleceu em Den Haag, 8 de Julho de 1695) foi um matemático, astrônomo e físico. Descobriu os anéis do planeta Saturno e contribuiu também para o estudo da luz (Imagem: Établissement de l’Académie des Sciences et Fondation de l’Observatoire)

Também para Leibnitz, o movimento de um corpo deveria ser medido pelo produto de sua massa pelo quadrado da velocidade (mv^2). A esta quantidade ele dava o nome de *vis viva*. Segundo Leibnitz, a *vis viva* não podia ser destruída, nem criada, conservando-se em todo universo.



Figura 14: Gottfried Wilhelm von Leibniz (Leipzig, Alemanha, 1 de Julho de 1646 — Hanôver, Alemanha, 14 de Novembro de 1716) foi matemático, filósofo e diplomata. Atuou também nos campos da lei, religião, política história e literatura. Juntamente com Newton, é creditada também a Leibniz a criação do Cálculo Diferencial e Integral (Imagem: Christoph Bernard Francke)

Em seus próprios estudos sobre a queda dos corpos, Leibniz estendeu a idéia da conservação da *vis viva*. Suponha que dois corpos de massa m , e $4m$ sejam erguidos respectivamente às alturas, $4h$ e h . Para Leibniz, o esforço do braço que levanta os corpos confere a cada um deles uma mesma quantidade de *vis viva*. Quando eles são abandonados, o movimento denuncia a *vis viva*. O corpo de maior massa cai de menor altura e atinge menor velocidade, enquanto que o corpo de menor massa cai de maior altura e atinge maior velocidade. Se fizermos os cálculos das velocidades atingidas pelo corpo em cada uma das situações veremos que o produto da massa pela velocidade ao quadrado é o mesmo em ambas.

Mas todas as idéias, mesmo engenhosas, passam por dificuldades. O que ocorre com a *vis viva* no caso de um corpo lançado para cima, perguntaram os críticos? Como a velocidade do corpo no ponto mais alto de sua trajetória é zero, o produto da massa pelo quadrado da velocidade também será. Ou seja, a *vis viva* parecia desaparecer neste caso. Leibniz afirmava que neste ponto, a *vis viva* ficava latente, escondida. Isto tanto parecia verdade, que logo em seguida o corpo voltaria a se movimentar e atingiria a velocidade original ao chegar à posição inicial. O que Leibniz susten-

tava é que a *vis viva* se conservava em todas as transformações por que passava um corpo em movimento. Basta apenas que procuremos onde ela se encontra. A *vis viva* pode ser entendida como a antecessora da idéia de energia de movimento ou *cinética*. A menos pela ausência de um fator $\frac{1}{2}$, a grandeza postulada como a *vis viva* é o que hoje chamamos de **energia cinética** (ver capítulo 7).

Ao longo dos séculos XVIII e XIX, os cientistas foram inferindo algum tipo de conservação em diversas situações, seja na colisão de esferas, na queima dos corpos, nos processos de transformação química, etc. Foi constatada a produção de eletricidade a partir do atrito, como nos processos de eletrização; a produção de efeitos magnéticos através de correntes elétricas, como nas experiências de **Hans Christian Ørsted** (1777–1851) de 1820; a produção de trabalho mecânico através do calor como nas máquinas a vapor. A formulação do que conhecemos hoje como **Princípio de Conservação da Energia** não foi obra de uma única pessoa nem fruto de trabalhos em uma área determinada da Ciência. Foi uma conquista do intelecto humano que se estendeu por quase três séculos.

Apesar da contribuição de vários autores, costuma-se atribuir a um trabalho de **Hermann Ferdinand Ludwig Von Helmholtz** (1821–1894), de 1847, a formulação explícita desse princípio²⁰. Numa das várias palestras que ele proferiu para divulgar e debater suas idéias, enunciou o Princípio da Conservação da Energia da seguinte forma:

“Chegamos à conclusão de que a natureza como um todo possui uma reserva de força que não pode, de qualquer modo, aumentar ou diminuir e que, portanto, a quantidade de força na natureza é precisamente tão eterna e inalterável como quantidade de matéria. Expressa nesta forma mencionei a lei geral: ‘O Princípio de Conservação da Força’”.

A linguagem científica ainda não era uniformizada (normatizada) e o termo *energia*, introduzido por **Thomas Young** (1773–1829) em 1807, só se tornaria consensual no final do século XIX. Helmholtz utilizava a palavra *força* para definir aquilo que hoje conhecemos como energia.

6 Apenas um início?

O desenvolvimento da Física nos seus mais de 300 anos de existência formal se estende por diversas outras

²⁰R. A. Martins. Mayer e a conservação da energia. Cadernos de História e Filosofia da Ciência (6): 63-95, 1984 é um trabalho interessante e particularmente esclarecedor sobre as origens do princípio de Conservação de Energia.

áreas de estudos, com a contribuição de cientistas de vários países. A mecânica newtoniana que permaneceu soberana por mais de dois séculos, foi revista e teve seu alcance limitado pelo Eletromagnetismo em meados do século XIX, como resultado dos trabalhos de Faraday, Maxwell, Hertz e Lorentz, entre outros. No início do século XX tanto a Mecânica como o Eletromagnetismo foram re-estruturados com a proposição da Teoria da Relatividade e da Quântica. Essas duas últimas teorias continuam sendo a base da Física atual, embora muitas teorias específicas as tenham completado. Hoje aceitamos a existência de quatro interações fundamentais. A busca por uma teoria unificada, capaz de interpretar todos os fenômenos físicos, continua sendo um objetivo da Física como área de conhecimento. Algumas tentativas tiveram sucesso na unificação de algumas dessas interações fundamentais, mas parece que ainda estamos longe disso²¹.

Desde os primórdios da civilização, o homem tem procurado entender os movimentos dos astros e as causas deste movimento. Apresentamos nesta introdução os principais progressos que levaram à mecânica newtoniana, que será estudada neste livro. Entretanto, esta teoria, apesar de seu grande sucesso e aplicações não é a última palavra no conhecimento de movimentos dos astros. A teoria da relatividade alterou significativamente a mecânica newtoniana quando se trata de objetos em velocidades muito altas, comparáveis à velocidade da luz. Em 1929 Edwin Hubble (1889–1953) propôs que o universo está em expansão, fornecendo informações que deram origem à teoria do big-bang. Por outro lado, recentemente (1998) foi descoberto que o universo está em expansão *acelerada*, um comportamento completamente diferente do esperado. Até o momento não existe nenhuma explicação aceitável

para este fenômeno. O próprio movimento das estrelas em torno de nossa galáxia (a **Via Láctea**) não pode ser explicado sem considerarmos a existência de uma quantidade de massa que ainda não foi encontrada, a chamada **matéria escura**. Este tipo de matéria misteriosa não emite luz nem qualquer outra radiação, mas representa cerca de cinco vezes a matéria comum conhecida. Assim, ainda hoje a compreensão do movimento das galáxias, estrelas e demais corpos celestes é um assunto atual de investigação. Sequer sabemos explicar porque a força gravitacional é proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância. Talvez estejamos apenas no início do conhecimento das leis que regem o movimento no Universo...

Referências

1. Thomas Kuhm; “A revolução copernicana: a astronomia planetária no desenvolvimento do pensamento Ocidental”. Lisboa: Edições 70, 1990.
2. Stephen F Mason, “A history of the sciences”, Collier Books, Macmillan Publishing Company, Nova York, USA, 1962.
3. Robert Locqueneux, “História da Física”, Publicações Europa-América, Portugal, 1989.
4. Gerard Holton, Duane H. D Roller, Duane Roller, “Fundamentos de la Física Moderna”, editorial Reverté S.A., 1963, Barcelona, Buenos Aires, México.
5. Projecto Física – (Harvard project), Lisboa, 1980.

²¹Atualmente, algumas versões de ‘teorias de cordas’ foram capazes de unificações entre algumas forças. O principal problema parece ser a dificuldade de se lidar com sistemas formais com muitas dimensões.