

# Aristóteles e a gravitação

Júlio C. Fabris

Universidade Federal do Espírito Santo

---

## Resumo

A primeira formulação de uma física completa, do ponto de vista lógico, foi feita por Aristóteles no século IV a.C. A física aristotélica dominou o pensamento ocidental por quase dois mil anos. Tentarei mostrar neste texto que as teses aristotélicas contêm um primeiro protótipo de teoria gravitacional, inteiramente refutada a partir dos conhecimentos atuais, mas mesmo assim importante pelo contexto em que surge e por suas diversas implicações.

## Abstract

The first formulation of a complete physics, from a logical point of view, was made by Aristotle in the 4th century BC. Aristotelian physics dominated Western thought for almost two thousand years. I will try to show in this text that the Aristotelian theses contain a first prototype of gravitational theory, entirely refuted from current knowledge, but nevertheless important for the context in which it arises and for its diverse implications.

---

**Palavras-chave:** Aristóteles, física, gravitação, cosmologia.

**Keywords:** Aristotle, physics, gravitation, cosmology.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.30464](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.30464)

## 1 Introdução

O objetivo deste artigo é discutir como a queda dos corpos, protótipo do fenômeno gravitacional, era entendido na Antiguidade, mais precisamente por Aristóteles, que foi talvez o primeiro sistematizador dos conhecimentos sobre a Natureza. Na ciência moderna, este fenômeno foi primeiramente explicado pela Lei da Atração Universal, formulada por Newton, no século XVII, à qual seguiu a descrição geométrica da teoria da relatividade geral, a moderna teoria da gravitação. As teses de Aristóteles sobre a queda dos corpos se encontram hoje ultrapassadas ou, mais precisamente, refutadas de forma inequívoca. Vale a pena analisá-las? Penso que sim, pois mesmo que erradas do ponto de vista da ciência moderna, as teses aristotélicas representam uma visão da natureza e do cosmo pelo menos coerente e, do ponto de vista lógico, completa.

Antes de entrar no âmago da física e da cosmogonia aristotélica, penso ser relevante falar um pouco do cenário fundamental da matéria e suas interações tal como descrito pela física contemporânea. A ambição maior da física é identifi-

car os constituintes fundamentais da matéria, conhecidos como *partículas elementares*, e as interações entre estes constituintes. Todos os fenômenos observados devem, a priori, ser explicados usando as partículas elementares e suas interações. Na prática, a forma complexa como as partículas elementares se combinam e interagem constitui um grande entrave para uma explicação completa dos fenômenos observados usando estes elementos fundamentais. Mesmo assim, o sucesso que a física alcançou na descrição da natureza observada é notável. Somos capazes hoje de explicar fenômenos microscópicos, subatômicos, e fenômenos macroscópicos, mesmo em escalas cosmológicas, através de um conjunto pequeno de leis fundamentais. Desta forma, o domínio experimental e observacional abarcado pela física se estende de escalas da ordem de  $10^{-18}$  m a  $10^{26}$  m, com enorme sucesso.

O modelo padrão das partículas elementares resume o conteúdo de partículas e interações conhecidas. Este modelo inclui 6 tipos de partículas conhecidas como quarks, e 6 outras partículas conhecidas como léptons, organizadas em três *famílias*, cada uma contendo dois quarks e dois

léptons. As interações entre elas incluem a eletromagnética, bem conhecida, além de duas outras que são extremamente relevantes no mundo subatômico, mas dificilmente identificáveis no nosso mundo macroscópico, as interações forte e fraca. A elas devemos acrescentar uma quarta interação, a gravitacional, responsável pela queda dos corpos na superfície da Terra, e pelo movimento dos corpos celestes. Assim, além das três famílias de partículas elementares, a física se baseia hoje nestas quatro interações que dizem como estas partículas, reunidas nos corpos macroscópicos e microscópicos, agem entre si.

Das quatro interações fundamentais, a gravitacional é a que temos acesso mais direto e que podemos estudar de forma mais simples. Podemos, por exemplo, analisar os movimentos de queda de um corpo sobre a superfície terrestre. Assim, é natural que, das quatro interações, a gravitacional tenha sido a primeira a ser contemplada com uma formulação teórica, expressa na lei da gravitação universal de Isaac Newton (1643–1727) no século XVII. É a conhecida lei que diz que corpos massivos se atraem na razão direta do produto das massas e do inverso do quadrado da distância. A lei da gravitação de Newton teve um sucesso extraordinário na explicação da queda dos objetos sobre a superfície da Terra e do movimento dos corpos celestes. Hoje a moderna teoria da gravitação é a teoria da relatividade geral (RG) que descreve a gravitação como a geometria do espaço-tempo determinada pela matéria. No entanto, a teoria newtoniana continua sendo usada pois suas previsões só diferem substancialmente das previsões da RG quando as velocidades e/ou massas envolvidas são extremamente grandes.

Podemos dizer que a física moderna começa com os trabalhos de Galileu (1564–1642) e, sobretudo, com a publicação do livro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* [1] de Newton, em 1687, que lança as bases da Mecânica e da teoria gravitacional de uma forma coerente e sistemática. No entanto, a obra de Newton não é a primeira tentativa de se criar uma descrição coerente do movimento dos corpos, incluindo suas causas. No século IV a.C. Aristóteles (385–323 a.C.), um dos maiores pensadores da antiguidade, escreveu o livro que intitulou *Física*<sup>1</sup>, e onde tenta sistema-

tizar o que conhecemos sobre o movimento, suas descrições, suas causas. As teses aristotélicas dominaram o pensamento humano por quase dois mil anos, sendo apenas abandonadas justamente pelos estudos de Galileu e Newton, entre outros investigadores que podemos denominar de *fundadores da ciência moderna*. Aristóteles defendia que o vazio não existe, o espaço estando totalmente preenchido por matéria, que o universo é esférico com o nosso planeta Terra no centro, e que os corpos caem pois eles buscam seu *lugar natural*, o centro da Terra.

Vale a pena se deter na análise de teses como estas, hoje já refutadas de forma inequívoca? Acredito que sim, e por vários motivos que vão além do puro interesse histórico. O principal deles é que a *Física* de Aristóteles é a primeira tentativa conhecida de desenvolver uma formulação sobre o movimento, sua descrição e suas causas, de forma completa, inteiramente lógica e com suporte na observação [2, 3]. Ele descreve e discute todos os conceitos necessários para a análise do movimento, inclusive realizando uma análise crítica do que até então havia sido dito a este respeito.

O filósofo Martin Heidegger, um dos mais importantes do período moderno, dizia que a *Física* de Aristóteles é o livro mais fundamental da filosofia ocidental. A afirmação pode parecer exagerada, mas Aristóteles neste livro tenta defender uma tese aparentemente óbvia mas no fundo complexa: a existência do *movimento* pode ser entendida de forma lógica, racional, coerente. Neste sentido, a *Física* de Aristóteles teria sido uma resposta aos chamados filósofos eleáticos, Parmênides, Zenon e Melissos principalmente. Estes filósofos, que viviam na chamada *Magna Grécia*, o sul da Itália, na cidade de Eléa, da qual hoje só restam algumas ruínas, negavam a realidade do movimento usando argumentos puramente lógicos: a razão não poderia compreender o fenômeno do movimento [4].<sup>2</sup> Na *Física*, Aristóteles mostra que o movimento pode ser entendido, que suas causas e descrições são acessíveis à razão.

Entre os movimentos estudados por Aristóteles está o da queda dos corpos, entendido moderna-

como filósofos pré-socráticos, tinha como título *Peri Physics*, equivalente a *Sobre a Natureza*.

<sup>2</sup>De forma muito sucinta, o argumento dos eleatas era que todo movimento implica que algo que existe deixa de existir, ou algo que não existe passa a existir. Esta passagem do ser ao não-ser, ou vice-versa, é algo que violaria a capacidade de compreensão racional.

<sup>1</sup>A palavra *física* origina-se da palavra grega *physis*, cujo significado original é *natureza*. Os livros (a maior parte perdidos) dos primeiros filósofos gregos, conhecidos

mente como uma manifestação da interação gravitacional. Aristóteles diz que os corpos caem pois eles tendem ao seu *lugar natural*, o centro da Terra. Até que ponto isto pode ser levado a sério e ser objeto de algum interesse? A afirmação de Aristóteles está intimamente relacionada à sua visão do universo e à sua concepção do que é o movimento. Neste sentido, a tese sobre a queda dos corpos descrita por Aristóteles seria a primeira *teoria gravitacional*, falsa, hoje facilmente refutável, mas que tem ainda assim um sentido no âmbito da visão que Aristóteles tinha de da natureza e do universo. É isto que tentarei mostrar neste texto.

## 2 A Física de Aristóteles

Quando se fala na física aristotélica, alguns dos conceitos por ela estabelecidos surgem imediatamente à mente. Entre eles podemos citar.

1. Existem dois tipos de movimento: o natural e o forçado.
  - (a) No movimento *natural*, o corpo tende ao seu lugar *natural*. A fumaça sobe porque o seu lugar natural é nas altas camadas da atmosfera. A pedra cai pois o seu lugar natural é o centro da Terra.
  - (b) O movimento forçado implica que o corpo se desloca de uma forma não natural: uma pedra que é jogada para cima, por exemplo. O movimento forçado subentende o contato entre o objeto (a pedra) e o agente (a mão que sobre ela age). Todo o movimento forçado requer a ação de um agente sobre o objeto por contato.
2. Não existe o vazio, tudo está preenchido por matéria, mais densa ou menos densa. O movimento ainda assim é possível, um corpo cedendo lugar a outro. Se existisse o vazio, nenhum movimento seria possível pois o movimento implica em um contato entre o corpo e o agente que provoca o movimento. Não há força que age à distância.
3. O universo se compõe de um mundo sublunar, abaixo da esfera da Lua, onde há contínua mudança e transformação, e um mundo

supralunar, além da esfera da Lua, que contém a esfera das estrelas fixas, e onde não existe mudança.

- (a) Existem quatro elementos que compõem tudo o que observamos no mundo sublunar: a Água, o Ar, a Terra e o Fogo. Estes elementos sofrem contínuas transformações.
  - (b) O mundo supralunar é composto de um outro tipo de substância ao qual nós, que vivemos no mundo sublunar, não temos acesso direto. Na falta de outro nome, e como é a quinta componente do universo, dá-se o nome de *quintessência*.
4. O universo é esférico e finito. Nada há além das esferas fixas. A Terra ocupa o centro deste universo.

Todas estas concepções aristotélicas listadas acima são consideradas hoje, em princípio, superadas.<sup>3</sup> Por exemplo, os quatro elementos que compõem o mundo sublunar, resultado das observações já feitas pelos pensadores gregos anteriores a Aristóteles, foram relegadas a uma importância puramente histórica, tendo em vista a moderna teoria atômica ou, para ser mais preciso, a moderna teoria das partículas elementares que identifica os constituintes fundamentais nas três famílias de quarks e léptons. O conceito também de quintessência deve-se ao fato que observava-se que as estrelas pareciam guardar uma mesma posição na suposta esfera que girava em torno da Terra (suposto centro do universo). Logo, as estrelas, e esta própria esfera onde estariam incrustadas, pareciam não estar sujeitas às mudanças como ocorre no mundo sublunar. Logo, pareceu natural a Aristóteles imaginar que elas eram constituídas de uma substância diferente da que conhecemos na região em que vivemos. Postulou então que seria uma substância única, distinta da que conhecemos e incapaz de sofrer transformação. Como seria a quinta componente do universo, denominou-a *quintessência*.

Muitas destas concepções aristotélicas são resultado da observação direta e sensorial da natureza que nos envolve e a que pertencemos. A

<sup>3</sup>Enfatizo o *em princípio* pois pode-se pensar, como veremos depois, que alguns destas concepções podem ser reinterpretadas pela física moderna

distinção entre movimento forçado e natural é um exemplo. Se tenho uma pedra na mão e se a solto, ela cai. Nenhum esforço é feito: eu simplesmente solto. Este é um movimento natural. Para que a pedra suba, eu tenho que impulsioná-la com a mão, tenho que fazer um esforço. Este é o movimento forçado. Outro exemplo é a existência do vazio. Ninguém percebe o vazio. Mesmo o ar, que eu não vejo, eu o sinto, quando corro por exemplo, ou quando venta.

“A natureza tem horror ao vácuo” é uma frase atribuída a Aristóteles, repetida figurativamente em várias circunstâncias hoje.<sup>4</sup> Aristóteles dá um bonito exemplo de como esse *horror ao vácuo* funciona e como ele explica certos fenômenos naturais: o movimento de uma flecha lançada horizontalmente. Quando a flecha é lançada, ela sofre um impulso horizontal. Mas, o que a faz continuar no seu movimento horizontal (ou quase horizontal) quando o contato com o agente cessou? Ela deveria cair verticalmente para o seu *lugar natural*. A explicação é engenhosa: quando a flecha se desloca horizontalmente, ela movimenta a camada de ar, e cria o *vácuo* atrás dela; uma vez que a natureza tem horror ao vácuo, ar vem ocupar esta região e ao fazê-lo impulsiona a flecha mais para frente, e assim sucessivamente. O atrito da parte dianteira da flecha com o ar diminui o impulso, e ao mesmo tempo que a flecha se movimenta horizontalmente, ela perde impulso, e começa a se deslocar também verticalmente. Apenas no século XIV, mais de mil e quinhentos anos depois, esta descrição revelou-se inadequada pelos argumentos de Jean Buridan, importante filósofo e professor da Universidade de Paris, como discutiremos mais tarde.

Há uma outra interessante demonstração da não existência do vazio que é apresentada por Aristóteles na sua *Física*. Considere um corpo  $M$  se deslocando do ponto  $A$  ao ponto  $B$  em um meio com uma certa densidade  $\rho$ . Para que isto ocorra o corpo deve sofrer uma ação externa. Se a mesma ação atuar sobre esse corpo mas em um meio com a metade da densidade, o tempo  $T$  para o corpo ir de  $A$  até  $B$  cai pela metade. Diminuindo ainda mais a densidade, o tempo se torna ainda menor. Podemos resumir isto em uma fórmula que estabeleça que o tempo é diretamente

proporcional à densidade do meio:

$$T \propto \rho. \quad (1)$$

Ou mais precisamente,

$$T = k \frac{\rho}{D}, \quad (2)$$

onde  $D$  é a distância de  $A$  a  $B$ , e  $k$  é uma constante para ajustar as dimensões (obviamente estamos “modernizando” o raciocínio de Aristóteles). No vazio, definido como meio de densidade nula,  $\rho = 0$ , o tempo  $T$  se torna zero, e a velocidade para ir de  $A$  até  $B$  é infinita. Mas, a natureza não admite infinitos. Logo, o vazio não pode existir.

Que o movimento exija contato, é outra observação óbvia para Aristóteles. Para que um objeto em repouso se ponha em movimento, tenho que impulsioná-lo através do contato com minha mão por exemplo. A ação à distância, tão cara a Newton, não é algo intuitivo. Assim, o movimento é impossível no vazio, segundo Aristóteles, pois não há nada para impulsioná-lo. Ele fornece ainda um outro argumento para defender que o vazio não existe: no vazio um ponto  $A$  é idêntico ao ponto  $B$ . O movimento implica uma mudança. Mas, não há mudança nenhuma se um corpo sair do ponto  $A$  e for para um outro ponto  $B$ , já que no espaço vazio todos os pontos se equivalem. Aristóteles usa neste exemplo, de uma certa forma, o princípio de invariância por translação, algo extremamente importante na física moderna, mas em um contexto e com objetivos completamente distintos dos de hoje.

A *mecânica* aristotélica tem alguns aspectos interessantes, muito embora destoe completamente do que denominamos normalmente de *mecânica* hoje. Aristóteles raciocina muito engenhosamente sobre os fenômenos naturais. Mas, não faz experiências. Alexandre Koyré, um dos mais importantes historiadores da ciência, chama a atenção para uma transição importante quando a *ciência antiga* (Aristóteles, por exemplo) dá lugar à ciência nova (Galileu, Newton, por exemplo): o investigador deixa de contemplar unicamente a natureza para agir sobre ela. Isto abre as portas para a mecanização da nossa sociedade [5], fenômeno notável sobretudo a partir da Renascença.

Mas, como dizíamos, Aristóteles raciocina de forma engenhosa. Ele chega a sugerir uma fórmula no livro *Física* para o resultado de uma ação

<sup>4</sup>Em política por exemplo: “o poder tem horror ao vazio”.

sobre um corpo. O raciocínio é simplificado e o seguinte. Considere uma força  $F$  agindo sobre um corpo de massa  $M$ . Sobre a ação desta força, o corpo se move uma distância  $D$  em um tempo  $T$ . Se a massa do corpo for diminuída da metade, ele percorrerá uma distância  $2D$  no mesmo tempo  $T$ , ou a distância  $D$  em um tempo  $T/2$ . Podemos arriscar escrever a fórmula matemática correspondente (Aristóteles não o faz, nossa maneira de se expressar matematicamente lhe sendo estranha):

$$F = M \frac{D}{T}. \quad (3)$$

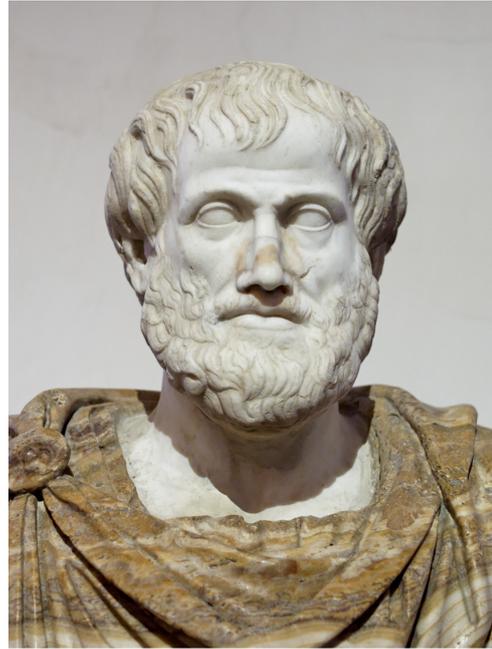
Esta fórmula supõe algo importante, como já foi dito antes: o movimento só é possível quando há ação de alguma força (denominado simplesmente “ação”), cessando a força, cessa o movimento. Sob esta hipótese, a relação (3) se torna inevitável. Como corolário, a força faz o corpo ter uma velocidade, o conceito de aceleração sendo ainda muito pouco elaborado na física aristotélica.

Um outro aspecto importante da *mecânica* aristotélica se refere à impossibilidade de um movimento retilíneo uniforme eterno. Tal movimento é possível na mecânica newtoniana, onde o espaço é vazio e infinito (o espaço euclidiano). Isto é impossível para Aristóteles pois o universo aristotélico é finito e esférico. Logo, em um dado momento, o corpo em movimento deve voltar: não haveria para onde ir em um movimento retilíneo uniforme eterno. Por outro lado, ele considera que é possível um movimento circular eterno. Aliás, era isto que ele parecia observar, por exemplo, no movimento do Sol e das estrelas.

Mas, nosso assunto principal aqui é a gravitação. E para entender a gravitação é preciso ter em mente a concepção aristotélica do universo como uma esfera finita com a Terra em seu centro.

### 3 Uma teoria da gravitação

O que podemos chamar de *teoria aristotélica da gravitação* é algo bem simples. Se resumiria, em princípio à frase: o movimento natural dos corpos pesados é em direção ao centro da Terra, seu lugar natural. Em primeiro lugar o que Aristóteles tem em mente, ao se referir a *corpos pesados*, são os corpos constituídos, entre os quatro elementos, principalmente pela componente *Terra*. Sabemos que a fumaça sobe: seu lugar natural é nas altas



**Figura 1:** Busto de Aristóteles. Cópia romana a partir do original de Lisipo (século IV a.C.), que se encontra no Museo Nazionale Romano, Roma, Itália.

camadas da atmosfera. Logo, o Fogo e o Ar não “tendem naturalmente” para o centro da Terra. Quanto à Água, o fenômeno da chuva mostra que a situação é mais complexa. No entanto, a Água, grosso modo, se comporta de maneira próxima ao elemento Terra: como veremos depois, o lugar natural da Água seria a segunda esfera cósmica, que envolve a primeira esfera, a central, do elemento Terra. Para todos os propósitos, ao falarmos de corpos que têm como seu lugar natural o centro da Terra, consideraremos corpos pesados, compostos principalmente do elemento Terra mesmo que os demais elementos possam estar presentes em menor quantidade.

Uma teoria da gravitação que se resume à afirmativa “Os corpos pesados tendem a ir para o seu lugar natural, o centro da Terra” parece em princípio algo, além de errôneo, simplista e muito limitado. No entanto, a teoria aristotélica é bem mais rica. Na verdade, para aquela afirmação fazer sentido, é preciso não apenas uma visão do que a matéria é composta, como também uma construção cosmogônica que dê sentido à visão aristotélica do fenômeno da queda dos corpos, fenômeno que denominamos hoje de *gravitacional*.

Em primeiro lugar, Aristóteles precisava de uma teoria sobre a constituição da matéria. Ele usou a visão, grosso modo, empregada pelos seus

predecessores, que a matéria tem como elementos fundamentais constituintes a Água, a Terra, o Fogo e o Ar. Ao contrário de algum dos seus predecessores, não elegeu nenhum desses elementos como sendo o *elemento primordial*: todos os quatro têm o mesmo status.<sup>5</sup> Mas, acrescentou um quinto elemento, a quintessência, que comporia o mundo supralunar, onde não há mudança, ao contrário do mundo sublunar, onde vivemos, em que a mudança é constante. A gravidade, entendida como queda dos corpos, agiria sobre os elementos pesados, constituídos principalmente pelo elemento Terra.

No entanto, isto não basta. Os elementos pesados devem tender para o centro da Terra. Isto supõe uma estrutura do cosmos. Em primeiro lugar, a Terra deve ser esférica. Mais que isto, aliás: o universo deve ser composto de esferas concêntricas, a primeira a do elemento Terra, a segunda do elemento Água, depois Ar, Fogo, Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, e assim por diante, sendo a mais distante delas a esfera das estrelas fixas, composta, como todas as esferas a partir da Lua, do elemento quintessência. Além da esfera das estrelas fixas não existe nada, sequer espaço. Assim, a forma do universo é não apenas esférica, mas também sua dimensão é finita. Na Figura 2 é mostrada uma representação renascentista do cosmo aristotélico. Nesta estrutura, pode-se falar de um *centro*: o centro da Terra é o centro de todo o universo. Logo, a afirmação de que os objetos pesados caem para o centro da Terra tem uma significação absoluta e inequívoca.

A concepção aristotélica de um *lugar natural* para onde os objetos tendem adquire um sentido neste mundo esférico e finito. Se Aristóteles tivesse dito que os objetos tendem para um ponto qualquer do espaço, esta afirmação seria totalmente arbitrária. Por que este ponto e não um outro? Mas, esta arbitrariedade não existe na concepção de um lugar natural para onde os objetos tendem, tal qual Aristóteles concebeu: para os corpos pesados, o lugar natural no caso é o centro do universo, que coincide com o centro da Terra, pois a Terra ocupa a posição central nesta estrutura cósmica. Esta *gravitação aristotélica* requer o geocentrismo, assim como requer um universo finito. Há uma visão cósmica coerentemente for-

mulada, do ponto de vista lógico, em acordo com a noção de *lugar natural para onde os corpos pesados tendem*. Mais precisamente, os elementos fundamentais tendem a ir *naturalmente* para suas esferas correspondentes. Os movimentos forçados provocam a mistura dos elementos.

A escolha da forma esférica para o universo é absolutamente normal para a época. O universo deveria, na visão dos gregos, ter uma forma simples e perfeita. A esfera preenchia estes requisitos, assim como o círculo preencheria também os requisitos no que diz respeito ao movimento dos astros. A forma de se proceder a uma construção científica (e em certo sentido hoje também) na época buscava a *simplicidade*: o círculo, a esfera, pareciam ser as formas mais simples e perfeitas. Era muito estranho para a mentalidade grega de então imaginar que as órbitas pudessem ser elipses ou qualquer outra figura mais complicada, ou que um astro ou mesmo o universo pudesse ter uma forma mais complexa que uma esfera, uma elipsoide por exemplo. Tal forma de construir o mecanismo cósmico, seguindo os padrões de simplicidade e perfeição, iria guiar a visão do cosmo até a Renascença, permeando até mesmo a visão cósmica de Copérnico<sup>6</sup>, que ainda consideraria as órbitas, da mesma forma que Ptolomeu<sup>7</sup>, como uma combinação de círculos.

Seria possível, na estrutura concebida por Aristóteles, em princípio, se perguntar o que aconteceria com um objeto que caísse na Lua, ou em outros planetas. Mas, tal tipo de questão soaria estranha à mentalidade grega de então, pois ela teria como pressuposto que a Lua e outros planetas eram *mundos* como o nosso. No entanto, estes objetos eram vistos como parte da estrutura cósmica que se limita a girar em torno da Terra (os planetas de uma forma bastante irregular, aliás, como se veria depois). Soa inconcebível que haja uma pedra na Lua que possa ser jogada. O mundo, lugar onde os fenômenos ocorrem, onde existe alguém para observar o que acontece, é apenas a Terra, centro de todo o universo. Admitir vários mundos anulava toda a construção lógica de Aristóteles, pois se há vários mundos há vários centros possíveis, e a noção de lugar natural es-

<sup>5</sup>Entre os filósofos pré-socráticos, Tales de Mileto (624–546 a.C.), egeria a Água como sendo o verdadeiro elemento fundamental dos quais os outros se compõem, Heráclito (500–450 a.C.), diria ser o Fogo, etc. [4]

<sup>6</sup>Nicolaus Copérnico (1473–1543 d.C.), primeiro formulador consistente de um sistema heliocêntrico, com o Sol no centro, exposto no livro *Da revolução das esferas celestes*.

<sup>7</sup>Claudio Ptolomeu (90–168 d.C.), sistematizador do sistema geocêntrico exposto em sua obra *Almagesto*.

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



**Figura 2:** Representação do cosmo aristotélico por Petrus Apianus contida no seu livro *Cosmografia*, 1524.

taria em dificuldades. Vê-se também nesta estrutura que o mundo teria que ser finito: um mundo infinito acabaria com a noção da esfera das estrelas fixas, de limite a partir do qual o universo termina. E em um universo infinito, a noção de centro também desaparece.

É preciso alertar que a concepção *gravitacional* aristotélica tem aspectos mais complexos do que o exposto aqui. Afinal, por que um corpo *precisa* ir para o seu *lugar natural*? Sem entrar muito em detalhes, há no aristotelismo os conceitos fundamentais de existir *em potência* e existir *em ato*. Em um bloco de mármore, uma estátua existe *em potência*. Quando o escultor cria uma escultura a partir do bloco de mármore, a estátua passa a existir *em ato*. Todo o movimento implica a passagem de um estado em potência para um estado em ato. É através destes conceitos de potência e ato que Aristóteles procura contornar as dificuldades lógicas dos filósofos eleáticos. O lugar natural da pedra que está na minha mão, é o centro da Terra. Minha mão impede que ele ocupe este lugar pois minha mão impede (ação forçada, não natural). Mas, a pedra está *em potência* no seu lugar natural, não *em ato*. Ao soltá-la, ela passa da sua condição em potência para sua condição em ato. Tudo isto pode nos parecer estranho, mas o edifício lógico de Aristóteles é, no final, muito bem concatenado.

A *gravidade aristotélica* nos soa estranha, so-

bretudo depois que Galileu, Kepler<sup>8</sup> e Newton revelaram os principais aspectos da interação gravitacional e que são confirmados pela observação. Na gravidade newtoniana, em especial, o vazio é essencial, a gravidade é uma força, uma interação, que age à distância, as órbitas são elipses, e o formato dos corpos celestes é na verdade mais próximo de uma elipsoide devido à rotação destes corpos em torno do seu próprio eixo. No entanto, impressiona a coerência lógica da construção de Aristóteles e o fato de se ater ao que se conhecia e se podia observar na época. A física aristotélica é tão bem concebida, para o nível de conhecimento que se tinha então, que viria a reinar por quase vinte séculos.

#### 4 Um longo domínio

Costuma-se dizer que a física aristotélica dominou o pensamento humano durante quase dois mil anos. De fato, o sistema aristotélico foi uma referência fundamental em filosofia (e, por extensão, em ciência) do século IV a.C. até aproximadamente o século XV. Este domínio só teria sido encerrado com o aparecimento de novas práticas científicas no final da Idade Média, início do período renascentista. É difícil estabelecer datas precisas desta mudança. Tal mudança constitui o que o historiador da ciência Thomas Kuhn denominaria de *mudança de paradigma*: um paradigma é uma forma estruturada de fazer ciência na qual os tipos de perguntas e procedimentos para responder a essas perguntas possuem um sentido; uma revolução científica implica em uma mudança de paradigma [6]. Na física aristotélica por exemplo perguntar como um corpo cairia na Lua, como já discutimos, não faz sentido pois a Lua pertence a outra esfera não submetida aos mesmos fenômenos que ocorrem na Terra. Para que esta pergunta faça sentido, temos que admitir que a Lua é um objeto similar ao nosso planeta Terra. Aliás, já teríamos que admitir que a Terra é um planeta como vários outros. Tudo isto é absolutamente estranho às concepções desenvolvidas por Aristóteles, tanto na física quanto na cosmogonia, dois domínios simbióticos em Aristóteles, como já discutimos.

<sup>8</sup>Johannes Kepler (1571–1630), astrônomo alemão que descobriu que os planetas seguiam órbitas elípticas, e não circulares, em torno do Sol.

O fato é que o paradigma aristotélico (no sentido de Kuhn) teria começado a desmoronar a partir do século XIII. Um dos atores para esta *revolução científica* teria sido Roger Bacon (1214–1292), um frade franciscano inglês que desenvolveu vários estudos experimentais, principalmente em ótica, e que foram muito importantes posteriormente inclusive para o desenvolvimento do telescópio e do microscópio. Ele teria concebido a noção de *leis da natureza*, tão cara à física moderna, e teria sido um dos artífices do método indutivo, partindo dos fatos particulares que seriam sistematizados em uma lei. No entanto, em um estudo sobre a origem da ciência moderna, Koyré [7] diz que não podemos remontá-la a Bacon e outros contemporâneos seus: a ciência moderna, em particular a física, teria sua raiz mais tarde, em Galileu em especial devido à ideia da *matematização* da natureza: a natureza é escrita na linguagem matemática, diria Galileu, e isto é fundamental para entender a física atual.

No entanto, o domínio das concepções de Aristóteles por quase dois mil anos tem que ser visto com certo cuidado. Em primeiro lugar, não foi um domínio tão absoluto quanto se pensa: seu mestre na juventude, Platão, influenciou muito o pensamento ocidental durante este período. Platão e Aristóteles são duas concepções diferentes da ciência: enquanto Platão elegia a matemática como a ciência fundamental, Aristóteles considerava o estudo da natureza como o ponto de partida de toda ciência; Aristóteles considerava que o que vemos e sentimos *existe*, ao passo que Platão considerava que a verdadeira existência é atributo das Ideias imutáveis e perfeitas, que existem em um plano unicamente acessível pela razão e pela abstração, e das quais tudo o que vemos e sentimos são apenas cópias mutáveis e imperfeitas. A diferença entre os dois é tão profunda que uns vêm Aristóteles como pai (ou avô) do realismo nas artes, enquanto Platão seria o primeiro teórico da arte abstrata: para Aristóteles, a arte é imitação da natureza; para Platão, a arte é uma representação daquelas Ideias perfeitas e imutáveis que não são diretamente percebidas no mundo real.

É preciso lembrar também que Aristóteles ficou praticamente esquecido em boa parte do período medieval, pelo menos no mundo ocidental. No entanto, ele teria sido “preservado” pelos sábios árabes, principalmente Avicena (980–1037) e Averróis (1126–1198). Aristóteles seria

em seguida redescoberto no ocidente, e sua filosofia seria *cristianizada* por São Tomás de Aquino (1225–1274) que criaria um monumental edifício teológico profundamente inspirado pelas ideias de Aristóteles, a *Suma Teológica*, e que até hoje pode ser considerado como a teologia oficial da Igreja Católica [8]. Nesta estrutura teológica, não apenas certos conceitos da física de Aristóteles seriam usadas para tentar fundamentar *provas* da existência de Deus (o “primeiro motor”<sup>9</sup> do movimento que observamos), como também a concepção da Terra e do Céu seguiria a estrutura das esferas celestes de Aristóteles.<sup>10</sup> Platão também influenciaria, paralelamente, o pensamento religioso ocidental através, por exemplo, de Santo Agostinho (354–430). Mas, Aristóteles seria, para a maior parte dos estudiosos, religiosos ou não, a principal fonte de pesquisa até que, efetivamente, uma mudança de paradigma se completasse a partir da Renascença. Curiosamente, a revolução então operada a partir da Renascença, através do papel da matemática e da geometria na descrição da Natureza, implica uma certa identificação com Platão, para quem essas ciências são portas de acesso às Ideias eternas e imutáveis.

## 5 Superando Aristóteles: rumo a Galileu e Newton

O caminho que leva à superação das teses aristotélicas e possibilita o surgimento da ciência moderna é longo e não se resume a uma fase específica da história. A sistematização dos conhecimentos matemáticos sobre o espaço e a consequente formulação de uma geometria consistente, consubstanciada no livro *Elementos* de Euclides (século III a.C.), é um dos primeiros passos. Embora um dos aspectos-chaves da Cosmogonia aristotélica fosse o universo esférico, finito, não há uma preocupação de estabelecer uma visão geométrica. Newton, por sua vez, no século XVII

<sup>9</sup>O conceito de *primeiro motor* é muito importante em Aristóteles. Sucintamente pode ser resumido como se segue. *A* é o agente do movimento de *B*. Mas, algo tem que ser responsável pelo movimento de *A*. A cadeia de *agentes do movimento* se estende até algo que é causa de movimento mas que ele próprio não é movido por nenhum outro agente. Este é o *primeiro motor*. Para São Tomás de Aquino, este primeiro motor seria Deus.

<sup>10</sup>Veja a descrição do Paraíso na *Divina Comédia* de Dante Alighieri (1265–1321), um dos livros fundadores da literatura ocidental e da língua italiana [9].

terá necessidade da geometria euclidiana para formular a *nova* física que substituirá a *antiga* física aristotélica. E por sua vez, a relatividade geral, moderna teoria da gravidade, tem como elemento chave a geometrização da interação gravitacional.

Mas, há outros aspectos. No espaço euclidiano, vazio e infinito, o movimento retilíneo eterno é concebível, ao contrário do que defendia Aristóteles. A noção de que a natureza tem horror ao vácuo, e que conseqüentemente o vácuo não pode existir, também é questionada e, finalmente abandonada. A física de Newton requer a possibilidade de existir o vazio. Nós já discutimos anteriormente como alguns argumentos de Aristóteles contra a possibilidade de existir o vazio, como no caso do movimento da flecha lançada, foram questionados e praticamente invalidados no início da Renascença. É importante salientar que alguns predecessores de Aristóteles defendiam a existência do vazio. Tal era o caso dos atomistas gregos, como Demócrito (460–370 a.C.). As teses atomistas, e conseqüentemente a realidade da existência do vazio, nunca foram esquecidas. Mas, foram relegadas a um plano secundário diante da autoridade de Aristóteles, até serem colocadas novamente em evidência por uma sequência de trabalhos, primeiro pela chamada *escola nominalista de Paris* (Jean Buridan e Nicole d’Oresme), depois pelo próprio Galileu e finalmente por Newton.

No caso da flecha lançada, que descreve o que hoje chamamos de *trajetória parabólica*, uma explicação diferente da de Aristóteles é formulada por Jean Buridan (1295–1358). O problema é como a flecha (ou uma pedra, se preferir) pode continuar seu movimento horizontal quando já perdeu contato com o agente, a mão que a lançou. Como vimos Aristóteles explica isto através do horror ao vazio. Buridan formula um argumento que questiona tal hipótese: se for uma flecha com a parte traseira que se afina, como este horror ao vazio poderia ser eficaz? Ele formula, alternativamente, a teoria do *impetus*: a mão transmite ao objeto um impetus que a projeta na direção que foi lançada. Este impetus é enfraquecido pela resistência do ar (algo que também desempenha um papel importante na explicação aristotélica do fenômeno) e o objeto, ao mesmo tempo que se desloca para frente, começa a cair, como de fato observamos, mas agora devido à perda do seu impetus. Buridan chega a estabelecer uma lei

de conservação: o impetus é conservado, a mão transferindo impetus para a flecha. E mais: a quantidade de impetus é proporcional à massa do corpo pela sua velocidade. Estão lançadas as bases para um dos conceitos mais importantes da Mecânica Newtoniana: o momento linear.

Uma das teses centrais da física de Aristóteles, e que sustentava sua *teoria gravitacional*, baseada na noção de lugar natural, era a do geocentrismo, a Terra como centro de um universo esférico e finito. Esta tese foi superada pelo sistema heliocêntrico proposto por Copérnico, depois aperfeiçoado por Galileu, Kepler e, finalmente, Newton. No entanto, não foi um caminho fácil colocar o Sol no centro e a Terra girando em torno dele. Para fazer isto, há algo que deveria ser mostrado possível mas que não era aparentemente em acordo com a observação: pode-se estar em movimento sem se perceber. Na verdade, seria preciso mostrar que o conceito de movimento pode ser puramente relativo, o observador se vendo sempre em repouso, e vendo os demais objetos se moverem.

O nome de Galileu é intimamente associado à esta concepção de que todo o movimento é relativo. Na física moderna as transformações conectando diferentes observadores (sistemas de referências) levam o nome de *transformações de Galileu*. No entanto, conceitualmente, esta questão já tinha sido abordada por um dos membros da escola nominalista de Paris no século XIV, quase duzentos anos antes de Galileu, Nicole d’Oresme (1323–1382), discípulo de Buridan. Ele diz explicitamente que se um observador está em um navio *A* e vê um outro navio *B* que se desloca, para ele sempre será este outro navio *B* que estará em movimento mesmo que, se em relação à margem, *B* esteja parado e *A* em movimento. Simetricamente um observador em *B* se dirá sempre em repouso atribuindo o movimento ao navio *A*: o movimento é sempre relativo.

Nicole d’Oresme faz outras afirmações importantes, cruciais para esta transição da física aristotélica para a física Moderna [10]. Ele diz, por exemplo, que se um observador que está em um navio que se desloca em movimento retilíneo uniforme deixar cair uma pedra, ele verá a pedra cair verticalmente, como se o navio estivesse parado. Até então se acreditava que a pedra “ficasse para trás” quando solta em um navio em movimento. A constatação feita por Nicole d’Oresme é crucial para que possamos estar sobre a Terra, que se

move em relação ao Sol, sem que nos apercebamos disto. Aliás, ele diz explicitamente que, se por algum fenômeno desconhecido, a Terra passasse a girar em torno do Sol, e não o Sol em torno da Terra, <sup>11</sup> nós na Terra não nos aperceberíamos e sempre diríamos que é o Sol que gira em torno da Terra pois nós observamos tudo a partir da Terra (é o nosso “navio”). A via para o heliocentrismo estava aberta sem que a percepção do movimento da Terra, por quem nela habita, constituísse um empecilho.

## 6 Conclusão

A física aristotélica foi relegada, em quase sua totalidade, ao domínio da história da ciência. Sabemos hoje que a Terra não é o centro do universo, e que os astros celestes são compostos da mesma matéria que o nosso mundo imediato, o planeta Terra. A distinção de mundo sublunar e supralunar desapareceu. Com isto, com a nossa visão do universo como composto de estrelas que se organizam em galáxias, aglomerados de galáxias e mesmo outras estruturas mais complexas, não é possível explicar a queda dos corpos como uma tendência dos corpos pesados de irem para o centro da Terra, seu *lugar natural*. Este *lugar natural* não existe mais. A *gravidade* aristotélica foi substituída, primeiro, pela gravitação universal de Newton, uma interação que age a distância, sem a necessidade de contato entre os corpos. Por sua vez, a gravitação newtoniana deu lugar à teoria da relatividade geral, que explica a gravitação através da geometria do espaço-tempo. Além disto, a noção de força que provoca o movimento por contato, dando velocidade aos corpos, foi totalmente revista pela mecânica de Newton: a partir de Newton, força, além de poder agir sem contato, provoca aceleração do corpo, não velocidade.

A física moderna é inteiramente distinta da de Aristóteles, e seria uma insensatez, por exemplo, ensinar física hoje usando Aristóteles, que só pode ser evocado em disciplinas de história da ciência ou de filosofia. No entanto, a *Física* de Aristóteles continua sendo um livro extraordinário, como frisou Heidegger, citado na Introdução: ele

<sup>11</sup>Nicole d’Oresme se declara geocentrista mesmo que reconheça que o movimento da Terra em torno do Sol é uma possibilidade, não podendo ser detectado por experiências simples feitas na Terra.

constrói de uma forma rigorosa uma ciência do movimento usando as observações disponíveis na época, além de uma lógica admirável. Ele introduz todos os conceitos fundamentais necessários para desenvolver o tema: o que é *lugar*, o que é *natureza*, as diferentes formas de falar de *movimento*, o que é *matéria*, entre vários outros conceitos. Se a física aristotélica não é mais a ciência física que conhecemos, o procedimento adotado por Aristóteles permanece um exemplo de rigor e de procedimento intelectual honesto e de caráter científico.

Dissemos acima que a física aristotélica foi refutada “em quase sua totalidade”. De fato, alguns conceitos aristotélicos podem ainda hoje ser objetos de discussão científica, mesmo que de uma forma bem diferente da sua versão original. Um exemplo é a questão da existência ou não do vazio. Aristóteles negava a existência do vazio, vazio que se tornaria essencial na mecânica e gravitação de Newton. Mas, falamos de “energia do vácuo”, candidato notável para descrever a “energia escura” que aceleraria o universo hoje. Esta nova visão está associada ao conceito de vácuo em teoria quântica de campos, e este vácuo dificilmente pode ser considerado como o *vazio* de Newton, tendo pontos de contato com o *pleno* aristotélico, mesmo que tal associação mereça ser mais profundamente discutida, sendo obviamente controversa. Além disto, Aristóteles faz uma distinção entre física e matemática que poderia ser inserida numa discussão moderna sobre o assunto [11].

Mesmo que o essencial de suas teses esteja refutado hoje, a *Física* de Aristóteles é ainda uma leitura obrigatória para quem se interessa pelo processo de construção de um edifício conceitual científico. A lamentar a ausência de uma tradução completa desta obra (“fundamental da filosofia ocidental”, nas palavras de Heidegger) em português.

## Agradecimentos

Agradeço a Alice Lopes Fabris, Oliver Piatella, Felipe Tovar Falciano e Cláudia Roldi Fabris pela leitura atenta do texto e pelas importantes sugestões. Este trabalho contou com apoio financeiro parcial da FAPES e do CNPq.

**Sobre o autor**

Júlio C. Fabris ([julio.fabris@cosmo-ufes.org](mailto:julio.fabris@cosmo-ufes.org)) é professor titular do Departamento de Física da UFES e pesquisador do CNPq. Atualmente é o coordenador do Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação (PPG-Cosmo) e do Núcleo Cosmo-ufes. Suas atividades científicas versam sobre física teórica, com especial ênfase em cosmologia e gravitação.

**Referências**

- [1] Isaac Newton, *Principia - Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* (Edusp, São Paulo, 2008).
- [2] Aristóteles, *Physique* (Flammarion, Paris, 2000).
- [3] Aristóteles, *Física, Livros I e II* (Editora da Unicamp, Campinas, 2009).
- [4] *Os Pré-socráticos, Os pensadores, Vol. 1* (Editora Abril, São Paulo, 1973).
- [5] Alexandre Koyré, *Do mundo fechado ao universo infinito* (Forense Universitária, Rio de Janeiro, 2001).
- [6] Thomas S. Kuhn, *A estrutura das revoluções científicas* (Editora Perspectiva, São Paulo, 1982).
- [7] Alexandre Koyré, *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Gallimard, Paris, 1973).
- [8] São Tomás de Aquino, *Suma teológica*, in *Os pensadores, Vol. 7* (Editora Abril, São Paulo, 1973).
- [9] Dante Alighieri, *A divina comédia* (Editora 34, São Paulo, 2009).
- [10] Thomas S. Kuhn, *A revolução copernicana* (Edições 70, São Paulo, 2002).
- [11] Augustin Mansion, *Introduction à la physique aristotélicienne* (Editions de L'Institut Supérieure de Philosophie, Louvain, 1987).