

HISTÓRIA DA FÍSICA I

FORMAÇÃO DAS CATEGORIAS DO  
PENSAMENTO EM FÍSICA  
(século VI a.C. — século XVII d.C.)

Penha Maria Cardozo Dias

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

e

Raquel Anna Sapunaru

Departamento de Filosofia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>PROBLEMAS DO CONHECIMENTO</b>	<b>4</b>
1.1	Quando, onde, o quê, o porquê . . . . .	5
1.2	O quê . . . . .	7
1.3	Física, Filosofia da Física e História da Física . . . . .	10
<b>2</b>	<b>O PROBLEMA DE “EXPLICAR” A NATUREZA</b>	<b>14</b>
2.1	Matéria . . . . .	14
2.1.1	Os Milesianos . . . . .	14
2.1.2	Água, ar, “apeiron” . . . . .	15
2.1.3	O “monismo” e seus problemas . . . . .	16
2.2	Forma . . . . .	16
2.2.1	Os Pitagóricos . . . . .	16
2.2.2	Organização, finalidade, beleza . . . . .	16
<b>3</b>	<b>O PROBLEMA DO “MOVIMENTO”</b>	<b>18</b>
3.1	O eterno ‘movimento’ . . . . .	18
3.2	A não-possibilidade do ‘movimento’ . . . . .	20
3.2.1	Parmênides de Elea . . . . .	20
3.2.2	O problema Eleático . . . . .	20
3.2.3	O “plenum” da Escola Eleática . . . . .	21
3.3	Reação ao “monismo” . . . . .	22
3.3.1	O Pluralismo . . . . .	22
3.3.2	O Atomismo . . . . .	22
<b>4</b>	<b>O ARISTOTELISMO</b>	<b>24</b>
4.1	A solução do problema Eleático . . . . .	25
4.1.1	Substância . . . . .	26
4.1.2	Forma (ser atual) <i>versus</i> ser potencial. . . . .	26
4.1.3	Transformação (movimento). . . . .	26
4.1.4	As quatro causas do ‘movimento’. . . . .	26
4.2	O deslocamento ou movimento local . . . . .	27
4.2.1	As causas do movimento local natural. . . . .	27
4.2.2	O movimento natural dos corpos celestes. . . . .	28
4.2.3	Movimentos locais, naturais e violentos (sub-lunares). . . . .	29
4.3	O problema da causa que mantém o movimento . . . . .	29

4.3.1	Definição do problema . . . . .	29
4.3.2	O ar . . . . .	30
4.4	Descrição do movimento local . . . . .	30
4.5	O problema do vácuo . . . . .	32
<b>5</b>	<b>CRÍTICAS A ARISTÓTELES</b>	
	<b>(ATÉ O SÉCULO XIII)</b>	<b>35</b>
5.1	A ação do meio. . . . .	35
5.2	A manutenção do movimento. A “força” impressa . . . . .	36
5.3	Tomás de Aquino e a geometrização do movimento . . . . .	38
5.4	O Édito de Tempier . . . . .	39
<b>6</b>	<b>O SÉCULO XIV</b>	<b>41</b>
6.1	A descrição do movimento . . . . .	42
6.1.1	William de Ockham . . . . .	42
6.1.2	A transformação das qualidades: Os Mertonianos . . . . .	43
6.2	O Teorema da Velocidade Média . . . . .	44
6.2.1	Enunciado . . . . .	44
6.2.2	Demonstração . . . . .	45
6.3	O ímpeto . . . . .	48
<b>7</b>	<b>GALILEU GALILEI:</b>	
	<b>O ÚLTIMO DOS ANTIGOS OU O PRIMEIRO DOS MODERNOS?</b>	<b>52</b>
7.1	A queda dos corpos na superfície da Terra . . . . .	54
7.2	O Princípio da Inércia . . . . .	55
7.3	O problema do movimento da Terra. O conceito de referencial . . . . .	57
7.4	Galileu e a medida da força pelo peso (1638) . . . . .	59
7.5	O caso da luneta . . . . .	60
<b>8</b>	<b>O PROBLEMA DA ASTRONOMIA</b>	<b>63</b>
8.1	A Astronomia Matemática . . . . .	64
8.2	O sistema ptolemaico . . . . .	66
8.2.1	Primeira e terceira “anomalias” . . . . .	66
8.2.2	Segunda “anomalia”: Excentricidades . . . . .	66
8.2.3	Propriedades do Sistema Ptolemaico . . . . .	67
8.3	O problema de Ptolomeu . . . . .	70
<b>9</b>	<b>O DEBATE ENTRE OS DOIS SISTEMAS ASTRONÔMICOS</b>	<b>71</b>
9.1	Tycho Brahe . . . . .	73
9.2	As Leis de Kepler . . . . .	73
<b>10</b>	<b>O PROGRAMA MECANICISTA</b>	<b>75</b>
10.1	O método da Filosofia Natural de Descartes . . . . .	76
10.1.1	A Filosofia Natural . . . . .	77
10.1.2	As três leis do movimento . . . . .	77

<b>11 O PROBLEMA DO MOVIMENTO CIRCULAR</b>	<b>81</b>
11.1 René Descartes: A “tendência” centrífuga . . . . .	82
11.1.1 A metafísica da Lei da Inércia . . . . .	82
11.1.2 A física do círculo . . . . .	82
11.2 Christiaan Huygens: A “força centrífuga” . . . . .	83
11.2.1 Analogia com o peso . . . . .	84
11.2.2 Paráfrase Moderna do Cálculo de Huygens . . . . .	85
11.3 O jovem Isaac Newton . . . . .	86
11.3.1 O “conatus recedendi à centro” (c.1664-1665) . . . . .	86
11.3.2 O movimento circular (1669) . . . . .	87
<b>12 OS PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS DA FILOSOFIA MECANICISTA</b>	<b>90</b>
12.1 Método de Hooke . . . . .	92
12.2 Construção do conceito de ‘força’ . . . . .	93
12.2.1 Fundamentos do mecanicismo . . . . .	93
12.2.2 Definição de ‘força’ . . . . .	94
12.3 Da “Terceira Lei” à “Gravitação Universal” . . . . .	95
12.4 O “estilo newtoniano” . . . . .	95
12.5 E a “Segunda Lei”? . . . . .	95
<b>13 O CONCEITO DE FORÇA</b>	<b>97</b>
13.1 Fundamentação do conceito de ‘força’ . . . . .	98
13.2 Força morta . . . . .	98
13.3 Força Viva . . . . .	99

# Capítulo 1

## PROBLEMAS DO CONHECIMENTO

### Meta da aula

Apresentar problemas encontrados ao se tentar definir o conhecimento: **Por que** é possível conhecer; o **que** é conhecer; **como** se adquire conhecimento.

### Objetivo da aula

Listar alguns problemas filosóficos envolvidos com a caracterização e aquisição do conhecimento.

### Introdução

Esta aula pretende atizar a curiosidade do estudante para problemas filosóficos envolvidos na definição e descrição do conhecimento. A História da Física, se usada de modo conveniente, mostra os argumentos invocados por aquele que estabeleceram as categorias do pensamento em Física; com tal meta, a construção conceitual é enfatizada nas aulas.

## 1.1 Quando, onde, o quê, o porquê



Figura 1.1: O mundo helênico, em 600 a.C. (*Atlas*, p.75). Situada no Mediterrâneo, por onde navegavam os Fenícios, tendo, à frente, o Egito, à direita, a Pérsia e o caminho para a Mesopotâmia e os ecos da antiga Babilônia, não é de se estranhar que as ilhas gregas fossem um terreno fértil a informações.

Não se pode precisar quando a Humanidade começou a se dedicar à investigação intelectual da Natureza. O mais afastado no tempo, de que se tem evidência, é o século VI a.C.; o “onde” é a Jônia, uma colônia grega, que se situava na costa oeste do que é, hoje, a Turquia e a cidade é Mileto. Eles criaram um vocábulo para se referir à totalidade do objeto de seu estudo, isto é, para se referir à Natureza — *Física*; depois, a palavra ‘Física’ veio a indicar o próprio estudo da Natureza ou *Filosofia Natural* (Duane D. Roller, 1981, p.206).

Perguntas típicas da *Filosofia Natural* poderiam ser: Por que as pedras caem? Por que a fumaça sobe? Por que os astros se movem de leste para oeste, em um círculo? Desse tipo de indagação nasceu a ciência. Mas o que está em questão, do ponto de vista da Filosofia, é: Os conhecimentos mais antigos, como o dos Egípcios e o dos Babilônios, não eram ciência? Quando um corpo de conhecimento constitui uma ciência? A resposta não é consensual e muitas das questões discutidas na História da Filosofia são tentativas de respostas. O filósofo traça parâmetros para que um corpo de conhecimento mereça o título “ciência”; o historiador é devedor do filósofo, mas é da natureza de sua disciplina analisar as diferentes atitudes que diferentes épocas dedicaram à mesma coisa.

Aristóteles, um filósofo do século IV-III a.C., portanto ainda muito próximo desse tempo (em escala histórica), reconhece que, dos egípcios, os gregos herdaram a Geometria (W.K.C. Guthrie, 1962, vol.1, p.35); além disso, sem dados astronômicos obtidos ao longo de milênios, portanto sem os dados obtidos pelos babilônios, teria sido impossível a Cláudio Ptolomeu (século II d.C.) obter os elementos observacionais, necessários aos cálculos de seu tratado de Astronomia. Mas essa “ciência” egípcia, se se pode usar o termo, segundo Guthrie (1962, vol.1, p.35), era prática, utilitária, usada para construir pirâmides, medir terras; a “ciência” babilônica foi (1962, vol.1, p.35) “um estudo prático, sua virtude estando na explicação que

dava ao homem educado do comportamento dos deuses estelares”. Guthrie (1962, vol.1, p.34) observa que os gregos “levantaram [a ciência] a um plano inteiramente diferente”; esse plano é (Guthrie, 1962, vol.1, p.36):

Aqui está a diferença fundamental entre eles [as civilizações mais antigas] e os Gregos. Os Gregos perguntara ‘Por que?’ e esse interesse em causas leva imediatamente a mais demandas: A demanda por generalização. O Egípcio sabe que o fogo é um instrumento útil. Ele tornará seus tijolos duros e duráveis, aquecerá sua casa, modificará areia em vidro, criará aço temperado e extrairá metais do minério. Ele [o egípcio] faz esas coisas e se contenta em aproveitar os resultados em cada caso. Mas se, como os Gregos, você pergunta *por que* a mesma coisa, o fogo, faz todas essas coisas diferentes, então você não mais está pensando separadamente o fogo que é aceso em fornos de tijolo, nas lareiras e o fogo na oficina do ferreiro. Você começa a perguntar qual é a natureza do fogo, em geral: Quais são as propriedades do fogo? O progresso em [fazer] generalizações mais altas constitui a essência do novo passo tomado pelos Gregos. Os métodos dos Babilônios têm um caráter algébrico e mostra que estavam cientes de certas regras algébricas, mas [...] “nenhuma tentativa foi feita para generalizar os resultados” [Guthrie cita outro autor]. Os Egípcios pensavam na geometria como uma questão de terras retangulares ou triangulares. Os Gregos a tiram do plano concreto e material e começam a pensar nos próprios retângulos e triângulos, que têm a mesma propriedade, estejam em campos de muitos acres ou em peças de madeira ou tecido de poucas polegadas ou, simplesmente, representados por linhas traçadas na areia.

#### COMEÇO DE BOX DE VERBETE

Acre: Unidade de medida de área.

#### FIM DE BOX DE VERBETE

Quanto ao “por quê”, não existe resposta de consenso. Um historiador muito importante, George Sarton, pergunta (p.162):

Como aconteceu que a ciência grega tivesse nascido na Jônia? [...] Eu vou aventurar oferecer duas explicações sociais. A primeira é que os colonizadores jônicos foram um grupo seletivo de pessoas vivendo em uma nova redondeza política, largamente de sua própria criação, isto é, de seu próprio agrado; de acordo, eles seriam corajosos, cheios de idéias, espontâneos e relativamente livres de restrições. [...]. A segunda é que a costa oeste da Anatólia era um lugar excelente para a mistura de idéias e culturas e o estímulo resultante. Na medida em que as pessoas ficam estagnadas em suas vilas ancestrais, elas não se perguntam muitas questões, pois cada pergunta foi feita e respondida um número de vezes e não há propósito em ficar se preocupando com elas. Pelo contrário, quando pessoas de diferentes raças e com tradições diferentes se agrupam, cedo ou tarde, ocorre aos mais inteligentes [no sentido de Sarton, pessoas individuais, não grupos] que há mais de um modo de se olhar para as coisas e de resolver problemas.

Um outro autor, Duanne Roller, apresenta uma teoria muito interessante. Para ele, a raiz do interesse dos gregos pela investigação teórica da Natureza está na sua religião. Segundo Roller, os deuses gregos possuíam duas características que motivaram os gregos ao estudo da Natureza: (1) Personificavam a Natureza. (2) Agiam com as mesmas motivações dos humanos, bajulavam, trapaceavam, discutiam entre si, etc. Ora, se assim, é possível entender os deuses. Conclui Roller (p.206):

E, porque esses deuses personificavam cada aspecto da natureza, a compreensão que os Jônios tinham de seus deuses foi transferido para o fenômeno natural.

Os jônios legaram muito mais à humanidade. Lendas cantadas por trovadores resultaram na *Ilíada* e na *Odisséia*, dois poemas que unem aqueles colonizadores em um mesmo passado e em uma mesma “estória”.

## Atividade

Pesquise no Dicionário de Filosofia Abbagnano três perguntas relativas à Física, feitas pelos primeiros filósofos gregos.

### Resposta

Por que as coisas mudam? Por que se transformam? Por que se repetem?

## 1.2 O quê

Os gregos antigos propuseram explicar a Natureza, as mudanças nela observadas e a regularidade dessas mudanças; por exemplo, pedras sempre caem, quando largadas, fumaça sempre sobe, os astros “valseiam nos céus, ao som do *Danúbio Azul*”, na brilhante metáfora de Stanley Kubrick.

### COMEÇO BOX CURIOSIDADE

Stanley Kubrick dirigiu um dos maiores clássicos do cinema, *2001 (Uma Odisséia no Espaço)*. Esse filme é um hino que canta a saga da espécie humana. Em um dos mais emocionantes momentos do filme, um gorila, ao som de *Zarathustra*, de Richard Strauss, atira um osso, que faz uma evolua no céu, e, na cena seguinte — em um dos mais belos cortes da filmatografia — se transforma na nave espacial que valseia ao som de *Danúbio Azul*, de Johann Strauss (o filho, pois seu pai, também músico, tinha o mesmo nome).

### FIM BOX CURIOSIDADE

Entretanto, a tarefa de entender a Natureza é um verdadeiro *Cavalo de Tróia*, que traz escondido, em suas entranhas, fortes suposições e problemas difíceis:

1. A própria colocação do problema supõe que a Natureza apresente “regularidades”. Não é suficiente “constatar as ‘regularidades’”, pois a ‘regularidade’ observada poderia ser uma halucinação coletiva; além disso, em Filosofia, como em Física, tudo que se diz tem de ser provado ou argumentado, não é questão de “opinião”.
2. A própria colocação do problema supõe que essas “regularidades” sejam acessíveis ao conhecimento, isto é, que possam, elas mesmas, ser explicadas.
3. Um problema, caso a Natureza seja, de fato, acessível ao conhecimento, é a definição das categorias com que pode ser explicada.
4. Outro problema é a demonstração de que as categorias com que a Natureza é explicada são corretas e, de preferência, unívocas.



## COMEÇO BOX VERBETE

Unívoco: Aquilo que só comporta uma forma de interpretação.

## FIM BOX VERBETE

Para pensar esses problemas, a Filosofia Natural nasceu com uma irmã gêmea, a *Epistemologia*. Essa é a parte da Filosofia que estuda o conhecimento. De modo geral, pode-se listar os seguintes problemas:

1. Um problema é o da natureza das leis científicas e dos termos descritivos de uma teoria.  
A corrente *realista* afirma que as leis são verdadeiras ou falsas e existem no mundo, bem como as entidades às quais se refere. Assim, por exemplo, a *Lei da Inércia* é uma verdade do mundo; elétrons, massas, existem independentemente de serem ou não observados.  
A corrente *fenomenalista* afirma que o que conhecemos são sensações e sucessões temporais de sensações. Uma teoria física, portanto, consiste de afirmativas sobre fenômenos apenas observados (na forma chamada *empiricismo*) ou sobre leitura de instrumentos (na forma chamada *instrumentalismo*).
2. Estudar como o conhecimento é adquirido, se mental ou empiricamente ou ambos.
3. Estudar como as leis de uma ciência são descobertas (para uns) ou construídas (para outros). Uma ciência da Natureza “extrai” (palavra vaga, propositadamente) da observação da Natureza, uma lei geral (essa lei é sobre entidades reais, no realismo, ou sobre sensações, no fenomenalismo).

Esse processo de ir do específico, isto é, o caso singular observado, ao geral é chamado de *processo de indução* ou, simplesmente, *indução*. Acontece que, do ponto de vista das leis da Lógica, esse processo não é justificável. Então, como se dá essa “generalização”? Existe um preceito racional geral de descoberta das leis (chamado “caminho da descoberta”)?

O processo não é justificado pelo seguinte. Uma inferência é uma seqüência de proposições do tipo:

Premissa maior: a lei  $A$  implica o fato  $B$   
Ocorrência: a lei  $A$   
Conclusão:  $B$ .

Se o dado for  $B$ , não se pode inferir  $A$ ; é suficiente pensar que, em termos de conjunto, ‘ $A$  implica  $B$ ’ é representado pelo conjunto  $A$  inteiramente contido dentro do conjunto  $B$ ;  $B$  poderia ter partes fora de  $A$ , logo sua ocorrência não necessariamente implica  $A$ . Ora, acontece que uma *indução*, por definição, deveria ser o seguinte processo de inferência:

Premissa maior: a lei  $A$  implica o fato  $B$   
Ocorrência: o fato  $B$   
Conclusão: a lei  $A$ ,

conclusão que é não justificável. Por outro lado, é difícil acreditar que leis sejam “ilógicamente formuladas”. Uma tentativa de responder a essa questão é estabelecer processos lógicos de procedimento intelectual para extrair leis do mundo observado; uma tal lista

de procedimentos do pensamento foi proposta por John Stuart Mill, um filósofo do século XIX, mas a lista é sujeita à mesma crítica que tenta resolver, isto é, como justificar os procedimentos listados?

4. Se a tarefa de uma ciência da Natureza é “extrair” princípios do fato observável, como se pode provar que o princípio é, de fato, uma verdade da Natureza ou, usando a expressão correta, *epistêmico*?

No século XVII, um filósofo escocês, David Hume mostrou que a veracidade das leis não pode ser demonstrada. Ele argumentou que a veracidade não pode ser estabelecida por um processo meramente mental; a razão é que, do ponto de vista das leis lógicas do pensamento, duas proposições contraditórias são expressões corretas do pensamento; por exemplo, a proposição

$p$  : ‘pedras caem’

e a proposição oposta

$\neg p$  : ‘não é o caso que pedras caiam’

são ambas corretas, formuladas de acordo com a sintaxe lógica. É correto dizer

$p \cup \neg p$  : ‘pedras caem **ou** não é o caso que pedras caiam’,

mas é incorreto afirmar:

$p \cap \neg p$  : ‘pedras caem **e** não é o caso que pedras caiam’.

Poderia ser dito: “Solte uma pedra e observe o que acontece”. Ora, continua o argumento de Hume, essa resposta cria um círculo vicioso: A veracidade não pode ser demonstrado por mera observação, pois, o que se deseja provar é que “se é observado, então é verdade”.

#### COMEÇO DE BOX CURIOSIDADE

David Hume quis ser o Isaac Newton da Psicologia. O subtítulo de seu *Tratado da Natureza Humana* denuncia esse propósito: “Uma tentativa de introduzir o método experimental de raciocínio nos assuntos morais”. Hume parte do princípio de que nossas idéias são cópias de impressões (isto é, dados empíricos). Esse é o ponto de vista tradicional da corrente epistemológica chamada *empirismo*; nessa corrente, a experiência é a fonte de todo saber. Ele dividiu as impressões em dois grandes grupos:

- (a) Impressões de sensação.
- (b) Impressões de reflexão, que seriam as emoções e as paixões.

#### FIM DE BOX CURIOSIDADE

Um autor, o austríaco Karl Popper, afirmou que não se pode demonstrar a verdade de uma teoria. Instâncias a favor da teoria a *corroboram*, fortalecem, são consistentes com ela, mas não a podem provar. A razão é que, do ponto de vista da Lógica, é suficiente um único fato contrário à teoria para derrubá-la; portanto, teorias são *falsificáveis*, mas não provadas serem certas.

Por outro lado, cientistas, em geral, não jogam fora uma teoria por causa de um único fato; é possível que o fato seja explicado mais tarde, por um detalhe pequeno. Um exemplo é o ângulo de paralaxe das estrelas (aula 9, figura 9.1): Sua não observação, no século XVI, de fato falsifica o *Sistema Copernicano* e corrobora o *Sistema Ptolemaico*; o ângulo de paralaxe é muito pequeno e teve de esperar o final do século XIX para ser observado com um telescópio suficientemente potente. Nem por isso os séculos XVII, XVIII e XIX deixaram de abraçar o *Sistema Copernicano*.

Um filósofo, Imre Lakatos, postulou que só “programas de pesquisa” e não teorias isoladas podem ser *falsificadas*: Um “programa de pesquisa” seria algo mais geral e abrangente, por exemplo, “a hipótese corpuscular”; enquanto que a “teoria cinética dos gases” seria algo mais particular referente aos corpúsculos. O valor epistêmico (conteúdo de verdade) da ciência só pode ser avaliado ao longo de sua história, através de “sobrevivência” a falsificações.

Existe uma relação profunda entre a história de uma ciência (Física, por exemplo) e a Epistemologia. Já foi dito que a História é o “laboratório da Epistemologia”; com essa máxima, quer-se dizer que a História aponta os elementos envolvidos na formulação de conceitos e novas idéias.

## Atividade

Por que se pode dizer que os gregos inventaram a ciência?

**Resposta**

Porque eles transformaram o saber prático em um conhecimento abstrato e universal.

## 1.3 Física, Filosofia da Física e História da Física

### Filosofia da Física

A Física como parte da Filosofia Natural há muito desapareceu dos departamentos de Física, no mundo inteiro. Isso não é, em princípio, ruim. Investigar em que se fundamentam os princípios da Física implica ter de responder a questões difíceis e, na maior parte das vezes, é preciso dominar as ferramentas, avançar na obtenção de conseqüências desses princípios, até que o conhecimento adquira maturidade. Entretanto, pensar os Fundamentos da Física é fazer Filosofia da Física, pois muitas questões dos Fundamentos da Física são filosóficas em sua natureza. Isso pode ser entendido por meio de exemplos:

1. Por que seria “o Livro da Natureza escrito na linguagem da Matemática”?
2. Por que o programa mecanicista, fundado nos séculos XVII e XVIII, por René Descartes, Christiaan Huygens, Isaac Newton e Gottfried Wilhelm Leibniz, de olhar para a Natureza como matéria em movimento “dá conta do mundo”, “funciona”? Será que o mundo (da Física) é só isso, “matéria em movimento”?
3. Por que *causas* são iguais a seus *efeitos*? Uma das críticas de Jean Le Rond D’Alembert à chamada equação de Newton (que, como se verá, não foi escrita por Newton) é que ela exige que se iguale a causa ( $\vec{F}$ ) a seu efeito ( $m\vec{a}$ ).

4. Qual a natureza do *espaço* e do *tempo*? O debate sobre a natureza do *espaço* e do *tempo*, entre Samuel Clarke (porta-voz de Newton) e Leibniz, deu-se em torno do conceito de *continuidade*, da *relatividade do movimento* e do *princípio da razão suficiente*.

Segundo Leibniz, se o movimento é relativo e, também, o espaço, deve existir no mundo um “elemento absoluto” que traga uma certa “identidade” às coisas; para ele, é a *força*, no sentido metafísico de *força primitiva ativa* (essência).

5. Moléculas e átomos obedecem a leis mecânicas. Como pode, então, o determinismo microscópico ser conciliado com o indeterminismo macroscópico da *Segunda Lei da Termodinâmica*? Essa questão gerou ramos da Física (Mecânica Estatística) e ramos da Matemática (Teoria Ergódica). A Teoria Ergódica descreve as propriedades que o movimento microscópico tem de ter para que, visto macroscopicamente, resulte nas leis estatísticas da Mecânica Estatística.
6. Se há sistemas físicos que são estatísticos, qual é, então a ‘realidade’? ‘Probabilidade’ entra na Física por uma questão de ignorância humana quanto à “preparação” do sistema ou é algo intrínseco à Natureza?
7. Qual a relação entre o conceito de ‘probabilidade’ e o de ‘indeterminismo’?

Muitas questões, tidas como “metafísicas”, podem vir a adquirir resposta dentro da Física, perdendo o status de metafísicas. Mas nem todas. Categorias de *substância*, *qualidade*, *relação* e outras foram propostas pelo filósofo Immanuel Kant como princípios *a priori* do pensamento e determinam o tipo de questão que se pode perguntar sobre a Natureza; são condições de possibilidade do pensamento científico. Se assim for, então é impossível fazer ciência sem uma dose de princípios metafísicos. Se assim, parece que a verdade das ciências seria condicionada à formação das categorias do pensar do *homo sapiens sapiens*, ao funcionamento do cérebro humano. Não haveria, aqui, um problema “ovo-galinha”? O comportamento neuro-fisiológico do cérebro depende das leis da Física, da Química e da Biologia, por outro lado, essas leis são o produto daquele.

## História da Física

Há modos de se fazer História da Física que não se relacionam a seus fundamentos. A história de uma ciência permite uma multiplicidade de enfoques, dependendo das perguntas às quais o historiador se dirige. Por exemplo, pode-se investigar:

1. O pano de fundo cultural, social e político (isso se chama, no jargão, *Weltanschauung*) para a leitura dos conceitos e métodos.
2. O contexto filosófico do pensamento científico, isto é, categorias filosóficas gerais, que são os pressupostos epistemológicos da possibilidade do pensamento científico, tais como *causalidade*, *substância*, etc.
3. Categorias filosóficas particulares, como a adesão a doutrinas filosóficas particulares, tais como *atomismo*, *ocasionalismo*, etc.
4. A História das instituições científicas.

Porém, nem todos os modos de se fazer História servem ao propósito do aprendizado de conceitos ou servem aos fundamentos da ciência.

A Física é não trivial, em sua essência. Porém, o uso de um conceito, ao longo de muitos anos ou séculos, tende a trivializar o não trivial; isto é, dificuldades conceituais são banalizadas, conceitos são tratados como “óbvios”. Isso deixa a desagradável sensação de que os conceitos são “mágicos”. Exemplificando: A Física começa enumerando as três leis da Mecânica; ora, a *Lei da Inércia*, a primeira delas, nem sequer é motivo de observação no dia-a-dia; que grau de confiabilidade pode-se ter, pois, nessa Lei? O ponto é que a discussão do problema da existência ou não do *vácuo* e da possibilidade do movimento no vácuo, que é análogo ao movimento inercial, feita nos séculos XIII e XIV, mostra os problemas que os conceitos de *vácuo* e de seu associado, o *movimento inercial*, pretendem solucionar, mostra os argumentos que convenceram àqueles que fundaram a Física.

A história da descoberta de um conceito mostra não somente *como* o conceito foi criado, mas, sobretudo, seu *porquê*. A História mostra as questões para cujas soluções o conceito foi introduzido, revela o que o conceito faz na teoria, sua função e seu significado. A História revive os *elementos do pensar* de uma época, revelando, pois, os ingredientes de um pensamento na época em que foi feito. Ela desvenda a *lógica* da construção conceitual; nesse esforço, ela revela, também, os “buracos lógicos” que o conceito preenche, revivendo o próprio ato intelectual da criação científica.

Além disso, a História é o “lugar natural” da análise conceitual; a História permite rever conceitos, criticá-los, recupera significados e os entende à luz de novas descobertas. Ela é, pois, *o instrumento da formação intelectual e da assimilação de conceitos*. Conseqüentemente:

**A História de uma ciência é essencial à heurística da descoberta científica, a História é o instrumento de formação dos pensadores de uma ciência particular.**

COMEÇO BOX VERBETE

Heurística: Conjunto de regras e métodos que conduzem à descoberta, à invenção e à resolução de problemas.

FIM BOX VERBETE

## Atividade

Procure em um dicionário de Filosofia as principais diferenças entre Filosofia e mito. Se possível, olhe o filme *300* e anote, nas conversas, as passagens em que um personagem usa argumentos lógicos contra argumentos místicos.

### Resposta

1. Enquanto o mito tem uma narrativa genealógica entre as forças divinas ou sobrenaturais, a Filosofia explica a produção natural das coisas através de causas naturais e pessoais.
2. Enquanto o mito não se preocupa com as contradições e com o incompreensível, a Filosofia não admite contradições e exige uma explicações lógica e racional para as coisas.
3. Enquanto a autoridade das explicações do mito são as pessoas, a Filosofia tem como autoridade a razão que é a mesma em todos os seres humanos e não somente a opinião do filósofo.

## Referências

- Abbagnano, Nicola (2003) *Dicionário de Filosofia*, Martins Fontes.
- Dias, Penha M. Cardoso (2001) “A (Im)pertinência da História ao Aprendizado da Física (Um Estudo de Caso)”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **23**, 226-235.
- Guthrie, W.K.C. (1950) *The Greek Philosophers (from Thales to Aristotle)*, Methuen & Co. Ltda; republicado em 1967, 1978 (citações referem-se à publicação de 1978).
- Guthrie, W.K.C. (1962) *A History of Greek Philosophy*, 2vols, Cambridge University Press; republicado em 1978, 1985 (citações referem-se à publicação de 1985).
- Harré, Rom (1972) *The Philosophies of Science (An Introductory Survey)*, Oxford University Press.
- Parker, Geoffrey (1995) (editor), *Atlas da História do Mundo*, Empresa Folha da Manhã; originalmente publicado em Inglês por Times Books, 1993.
- Roller, Duane H.D. (1981) “Greek Atomic Theory”, *American Journal of Physics* **49**, p.206-210.
- Sarton, George (1952) *Ancient Science through the Golden Age of Greece*, Harvard University Press; republicado por Dover, 1980 (citações referem-se à publicação de 1980).

## Capítulo 2

# O PROBLEMA DE “EXPLICAR” A NATUREZA

### Meta da aula

Apresentar significados para a “permanência” que traz ordem ao observado caos.

### Objetivo da aula

Descrever dificuldades envolvidas na questão “o quê é ‘explicar’?”.

### Introdução

Os gregos entenderam que deveria haver algo persistente atrás das mudanças que são observadas na Natureza, o qual conferisse *identidade* ao mundo e o explicasse. Nesta aula, apresenta-se como essa idéia foi, inicialmente, desenvolvida. A sugestão foi procurar a *identidade* na *substância-propriedade* de que é feito o mundo. A escolha dessa *substância-propriedade* foi fundamentada em uma relação muito particular que os gregos tinham com a Natureza.

A idéia de uma *substância-propriedade*, entretanto, leva a dificuldades insolúveis. Autores posteriores propuseram, então, outra resposta para essa suposta “persistência”; seria a *forma*, cujo significado envolve a idéia de estrutura, organização, finalidade.

## 2.1 Matéria

### 2.1.1 Os Milesianos

No século VI a.C., Tales, Anaximandro e Anaxímenes — todos da cidade de Mileto, na Jônia — propuseram que a *permanência* que traz ordem à Natureza deveria ser buscada na *matéria* ou, mais propriamente dito, na *substância* de que o mundo é feito. A pergunta colocada foi “de que é feito o mundo?”; a questão “qual a causa motriz do movimento?” não precisava ser colocada, pois a substância explicava seu próprio movimento e era eternamente viva.

Três substâncias, *água*, *ar* e *apeiron* foram propostas, independentemente. Um aspecto dessas substâncias era que (Guthrie, 1950, p.32) “o estofa do mundo era o estofa da vida”. Assim, a “água” era o princípio da vida, como interpretado por Aristóteles; o “ar” era a alma, o sopro da vida. Tales de Mileto teria dito “Tudo está repleto de deuses”, o que foi interpretado por Aristóteles como significando que “a alma está misturada ao todo”. Não existia separação, como hoje, entre matéria e espírito; a Natureza, embora material, era, também, “dotada de espírito e vida” (Guthrie, 1950, p.33).

### 2.1.2 Água, ar, “apeiron”

#### Água

Tales propôs que a substância fundamental fosse a *água*, em seu famoso provérbio: *A água é o princípio de todas as coisas*. Essa proposta não é uma opinião irresponsável, um mero “achismo”; Aristóteles interpretou esse provérbio do seguinte modo (*apud* Guthrie, 1950, p.32):

[Tales] obteve essa noção provavelmente ao ver que o nutriente de todas as coisas é úmido [...] e que o semen de todas as criaturas tem uma natureza úmida e a água é a origem da natureza das coisas úmidas.

#### Ar

Anaxímenes propôs que fosse o *ar*; claramente, ‘ar’ não pode ser entendido com conceitos modernos, tal como combinação de elementos; é, simplesmente, (Guthrie, 1950, p.29) a atmosfera que nos envolve sem maiores conotações. O *ar* pode ser condensado em água e neblina e em substâncias sólidas (terra, pedras) e, quando rarefeito, aquece-se e se transforma em fogo; assim, o processo que forma o mundo está na rarefação e na condensação; frio associa-se a condensado e quente, a rarefeito, o que é ilustrado do seguinte modo: Assoprando com os lábios apertados, o ar sai frio; assoprando com a boca bem aberta, o ar sai quente. Mas existe um outro aspecto desse “ar”: Em sua forma mais rarefeita, é o “estofa” da vida (Guthrie, 1950, p.30):

Uma pequena porção dessa alma-estofa [...] está aprisionada no corpo de cada animal ou ser humano e forma sua alma. “Nossa alma”[disse um seguidor de Anaxímenes] é ar [...].

#### Apeiron

Anaximandro viu o mundo como uma mistura de quatro propriedades fundamentais, opostas duas a duas: *quente e frio*, *úmido e seco*; nessa fase do pensamento, é mais provável que não se fizesse distinção entre a substância e suas propriedades.

Em um momento inicial do Universo, a matéria ou suas propriedades existiam em um estado latente, formando uma fusão, chamada *apeiron*. Essa fusão estava em movimento de rotação, o que causou a separação das várias qualidades-substâncias; portanto, o processo de formação do Universo é separação. A Terra está no centro do Universo e não haveria razão para que ela se movesse em uma direção ou outra.



### 2.1.3 O “monismo” e seus problemas

O ponto de vista de que uma substância única explica tudo do mundo é chamado *monismo*. A redução da explicação a um único conceito — o que se chama “reducionismo” — não necessariamente é saudável. No caso em questão, a dificuldade do *monismo* está nas dualidades *quente versus frio* e *seco versus úmido*: A água fria e úmida teria de originar uma substância quente e seca, por exemplo, poeira, fogo. Tentar resolver o problema supondo uma mistura de substância-propriedades não funciona, pois teria de se explicar como a substância-propriedade aparece; além de ter de explicar como as propriedades aparecem com seus opostos.

#### Atividade

Coloque, com suas palavras, o que você entendeu por ‘pluralismo?’

#### Resposta

Admissão de uma diversidade de princípios ou de substâncias para explicar o universo.

## 2.2 Forma

### 2.2.1 Os Pitagóricos

Pitágoras, da ilha grega de Samos, foi o fundador de uma escola de pensamento. Seus seguidores, chamados “pitagóricos”, estabeleceram-se no sul da Itália, na cidade de Croton. Eles formavam, sobretudo, uma irmandade religiosa, que se espalhou pela Grécia, e teve vida longa.

### 2.2.2 Organização, finalidade, beleza

Do lado religioso, os pitagóricos acreditavam em inúmeras encarnações e na transmigração das almas (Guthrie, 1950): A reencarnação poderia acontecer em forma não humana, mas animal; assim, era proibido comer carne, pois o animal, cuja carne era degustada, poderia ser habitado pela alma de uma pessoa. Ao misticismo, os pitagóricos acrescentaram princípios filosóficos (Guthrie, 1950, p.33-42):

1. A transmigração foi estendida como um parentesco entre as várias formas de vida e a Natureza, logo (Guthrie, 1950, p.35) “o Universo, como um todo, é uma criatura viva”, como acreditaram, também, os jônios.
2. Enfatizaram a *forma* ou *estrutura* como o objeto de estudo. A *forma* está ligada à organização. Para entender esse conceito, inicialmente criaram antinomias (qualidades opostas duas a duas) (Guthrie, 1962, vol.1, p.245):

limite	ímpar	univocidade	direita	masculino	repouso	reto	luz	bom	quadrado
ilimitado	par	pluralidade	esquerda	feminino	movimento	curvo	escuridão	mau	oblongo

Então o conceito de *organização* é introduzido pelo seguinte argumento (Guthrie, 1950, p.37):

O mundo é divino, portanto é bom e é um todo único. Se é bom, vivo e um todo, é porque é *limitado* e apresenta uma *ordem* na relação entre suas várias partes. Vida completa e eficiente depende de organização. Podemos ver isso em criaturas vivas, que chamamos *organismos*, para indicar que têm todas suas partes arranjadas e subordinadas com o fim de manter o todo vivo.

3. Para indicar esse todo organizado, criaram a palavra *kosmos*, que significa, ao mesmo tempo (Guthrie, 1950, p.37): *ordem, adequação, beleza*.
4. Se ‘explicar’ é exibir uma estrutura, essa estrutura é expressa em termos de quantidade (Guthrie, 1950, p.40). O processo para criar “harmonias” (Guthrie, 1950, p.39) é “confinar” ou impor “limites” para trazer ordem (ou “leis”, como se entende hoje). Na música (Guthrie, 1950, p.41), “limite” é representado pela proporção numérica das notas. Na medicina (p.41), “limite” e “ordem” são representados pela *harmonia* ou correta proporção de “quente e frio”, “úmido e seco” no corpo.

### Atividade

O que você entende por ‘experimento’?

#### Resposta

É uma experiência controlada ou dirigida, ou seja, é uma observação.

## Referências

- Guthrie, W.K.C. (1950) *The Greek Philosophers (from Thales to Aristotle)*, Methuen & Co. Ltda; republicado em 1967, 1978 (citações referem-se à publicação de 1978).
- Guthrie, W.K.C. (1962) *A History of Greek Philosophy*, 2vols, Cambridge University Press; republicado em 1978, 1985 (citações referem-se à publicação de 1985).

## Capítulo 3

# O PROBLEMA DO “MOVIMENTO”

### Meta da aula

Apresentar significados de ‘realidade’ e explicações do ‘movimento local’ ou deslocamento.

### Objetivo da aula

Descrever as dificuldades encontradas, na Antigüidade, para caracterizar as transformações observadas na Natureza.

### Introdução

A palavra ‘movimento’ significava transformação. Os filósofos que propuseram uma *substância-propriedade* não precisavam colocar o problema de justificar o movimento, pois as transformações vinham junto com a substância, como tudo o mais na Natureza. Filósofos gregos posteriores, que não eram comprometidos com a visão jônica, tiveram de enfrentar o problema de explicar o ‘movimento’. O problema vai ser discutido ao longo de séculos e, no decorrer da discussão, vão ser formadas muitas das categorias do que hoje se chama Física.

O problema do movimento nasce misturado com outro problema, o da “natureza da Natureza”: O que se vê, o que se ouve, o que se toca, um gosto que se sente, um cheiro, afinal, o que se apreende pelos sentidos realmente existe? Ou seriam as sensações enganosas, levando o ser humano a algum tipo de halucinação, vendo o que não existe; nesse caso, o quê existe? Qual a natureza, a essência, a verdadeira realidade do mundo? Nesta aula, apresenta-se duas correntes que marcaram o pensamento da humanidade e foram — e ainda são — um divisor de águas na Filosofia: O *racionalismo* exarcebado, que só acredita nas idéias, na mente e o *realismo*, que atribui verdade própria à Natureza.

### 3.1 O eterno ‘movimento’

Pouco se conhece de Heráclito de Éfeso; ele teria 40 anos por volta de 500 a.C., quando sua influência se fez sentir (Guthrie, 1962, vol.2). Ele apresentava suas idéias em forma de enigma e,

por isso, era chamado *O Enigmático*. Heráclito não pertenceu, a rigor, à tradição Milesiana de explicar a Natureza por uma substância material. Mas ao contestar os Milesianos, introduziu novos elementos à Filosofia Natural.

Uma das frases enigmáticas mais famosas de Heráclito é: *Não se pode pisar no mesmo rio duas vezes*. Essa frase é importante, pois aponta para uma idéia central no pensamento de Heráclito: A Natureza está em constante transformação ou, na terminologia da época, em *movimento*; a “harmonia” ou equilíbrio de opostos, pitagórica, não existe, os opostos estão em tensão; a fonte da vida é a luta, algo vive em destruição de outra coisa. Estudiosos modernos comparam essa visão do equilíbrio à de um arco estendido para atirar uma flecha (Guthrie, 1950, p.44): O arco está imóvel, aparentemente estático, porém está tenso, pronto a atirar a flecha. Os princípios centrais da Filosofia Natural Heraclitiana podem, portanto, ser resumidos (Guthrie, 1950, p.45):

1. Tudo vive do conflito, da oposição.
2. Tudo está em constante fluxo.

A “permanência” ou “unidade” que explica o Universo deve ser procurada no *logos*. Esse é um novo conceito, que, segundo Guthrie, é de difícil compreensão para nós, cerca de 26 séculos depois. O conhecimento é adquirido pelos sentidos, mas esses são diferentes para cada pessoa; a verdade, comum a todos, deve ser descoberta no *logos*. Nesse sentido, *logos* é “relato”, “descrição”, “pensamento”; mas o *logos* tem existência independente da pessoa (Guthrie, 1950, p.45-46): É “verdadeiro para sempre”, “é comum a todos”, “tudo acontece de acordo com ele”, “nós retiramos do *logos* divino pela respiração”. Portanto, *logos* é (Guthrie, 1950, p.46):

1. A mente de uma pessoa.
2. Algo material. É um *fogo* (cósmico) que permeia tudo.

#### COMEÇO DE BOX EXPLICATIVO

Guthrie lista 11 significados de *logos*, no Grego antigo (Guthrie, 1962, vol.1, p.420-424):

1. Qualquer coisa dita.
2. Reputação, fama.
3. Pesar prós e contras.
4. Argumentação, causa, raciocínio.
5. A verdade de uma questão, em oposição a pretexto, palavras vazias.
6. Medida, medida devida.
7. Correspondência, relação, proporção.
8. Princípio geral ou regra.
9. A faculdade da razão.
10. Definição ou fórmula expressando a natureza essencial de algo.
11. A palavra era comum no Grego e é achada em expressões as mais diversas, por exemplo: “O restante dos Jônios decidiram por *logos* comum” (concordaram), “Dario temeu que os Seis estivessem agindo por um *logos* comum” (em acordo ou conspiração); “aqueles que se consideram no *logos* de aliados” (que são chamados aliados); “aqueles que são reis no *logos* verdadeiro” (que são reis, de verdade).

Heráclito disse, também (Guthrie, 1950, p.45): *O mundo é um sempre-vivo fogo, aceso por medidas e em medidas apagando-se*. Embora em oposição aos jônicos, ainda é difícil para ele explicar o Universo sem se libertar inteiramente da visão jônica de que o que existe é a matéria. O *fogo* exemplifica a natureza sempre em transformação do Universo. O *logos* é, segundo um comentador de Heráclito, (Guthrie, 1950, p.46) *o fogo inteligente, a causa do arranjo do todo*.

## Atividade

Procure em um dicionário de Filosofia o significado do termo *kínesis*, em grego.

### Resposta

*Kínesis* é movimento. Movimento para os gregos antigos significava qualquer mudança qualitativa e/ou quantitativa de um ser, o que incluía seu nascimento e/ou morte. O movimento das coisas e do mundo chama-se *deír*.

## 3.2 A não-possibilidade do ‘movimento’

### 3.2.1 Parmênides de Elea

Parmênides de Elea nasceu e viveu na cidade de Elea, no sul da Itália (mapa, figura 1-1); estima-se que tivesse 65 anos por volta de 450 a.C. e seria, pois, uns 25 anos mais novo que Heráclito. Esses dois autores têm em comum terem colocado uma núvem no conhecimento puramente empírico. Mas foram um o oposto do outro, pois diferiram em um aspecto essencial: Heráclito considerou o ‘movimento’ para concluir que o Universo está em transformação (‘movimento’) incessante, trazendo “matéria em movimento” para o âmbito da Filosofia; Parmênides discute o ‘movimento’ para concluir que não existe (claro que no sentido de ‘existir’ de sua época) — e, com isso, coloca um problema para a Filosofia Natural de tal importância que autores subsequentes sentem que têm de responder ao desafio do problema — e assim o fez Aristóteles!

### 3.2.2 O problema Eleático

Parmênides apresenta um silogismo, no qual mostra a impossibilidade do ‘movimento’. Várias paráfrases do mesmo silogismo são (Guthrie, 1950, p.48):

1. Premissa maior 1: **“O que é”** não pode consistir de **“o que não é”**, pois **“o que não é”** não existe.

Premissa menor 1: ‘Transformação’ envolve **“tornar-se o que não é”**.

Conclusão 1: *‘Transformação’ é irreal* ou *‘movimento’ é impossível*.

2. Premissa maior 2: O Universo é **“o que é”** e não pode consistir de **“o que não é”**. O **“que é”** é matéria.

Premissa menor 2: Espaço vazio só pode ser definido como **“onde ‘o que é’ não é (esteja)”**.

Conclusão 2a: *Não há espaços vazios no Universo.*

Conclusão 2b: Pode-se inferir, novamente, que ‘movimento local’ (deslocamento) não pode existir, pois *não há espaços vazios para os quais uma coisa se possa mover.*

Desses silogismos, podem ser tiradas outras conseqüências, as quais tiveram impacto no pensamento filosófico:

1. Como transformação é impossível, mas é, contudo, observada na Natureza, só resta uma saída: Declarar que a *informação sensorial* (informação sobre a Natureza obtida pelos sentidos) é enganosa.
2. Se a informação sensorial é enganosa, *a aquisição de conhecimento sobre a Natureza é feita pela mente e não pela observação e a Filosofia Natural é uma atividade meramente intelectual.* Nasce aqui a suspeita sobre a observação; já foi dito, embora com algum exagero, que (Duane Roller, p.207) “desde então jamais uma teoria física foi aceita ou rejeitada unicamente na base da informação sensorial”.
3. O *monismo* é verdadeiro, pois espaço vazio não existe: O Universo é uma massa imóvel, de uma única substância, uma totalidade ou *plenum*. É indivisível, pois não há espaços vazios por onde uma faca (cós mica) pudesse entrar e dividi-lo.

O leitor deve ter notado uma confusão entre o verbo existencial (ser) e o verbo predicativo (estar); em algumas línguas, como Inglês e Francês, só existe um verbo (*to be*, em Inglês; *être*, em Francês) com dois sentidos, existencial e predicativo. Esses gregos antigos entenderam o verbo em seu sentido existencial, apenas, e associaram a isso uma concepção material de existência. É pertinente a seguinte especulação de Guthrie (1950, p.47):

A dificuldade deles, sem dúvida, teve algo a ver com a proximidade do estágio mágico primitivo, no qual uma palavra e seu objeto formavam um único todo.

### 3.2.3 O “plenum” da Escola Eleática

Melisso de Samos pertenceu à Escola Eleática, como são chamados os seguidores das idéias de Parmênides; por volta de 441 a.C. seria um filósofo maduro.

Em defesa da não existência do vácuo, ele argumentou que o Universo deve ser um *plenum*, isto é, uma totalidade única, sem vazios. Uma paráfrase do argumento é a seguinte (Guthrie, 1962, vol.2, 104-105): Se o Universo não fosse uma totalidade única, haveria espaços vazios que poderiam ser preenchidos; parece que o ponto é que o preenchimento desses espaços envolve ‘movimento’ (parece que no sentido restrito de “movimento local”), o que era proibido. Analogamente, se fosse uma pluralidade de coisas, cada uma dessas coisas teria de ser uma totalidade, um *plenum*; pois, se alguma não o fosse, aplicação do argumento acima levaria à conclusão absurda de existir “movimento” (Guthrie, 1962, vol.2, p.105): “*Assim, se houvesse muitas coisas, elas teriam de ser tal como o Um*”, disse Melisso.

COMEÇO DE BOX DE CURIOSIDADE

Melisso de Samos era almirante na frota de Samos e filósofo ocasional. Como fiel seguidor de Parmênides, acreditava que os navios que comandava não se movia de fato e as batalhas não aconteciam!

FIM DE BOX DE CURIOSIDADE

## Atividades

Coloque, com suas palavras, o argumento da imutabilidade da Escola Eleata ou Eleática.

### Resposta

Uma formulação que não está no texto, mas muito elegante, é: O Ser é imutável e o devir é uma ilusão de nossos sentidos, porque, se o Ser mudasse, no que ele mudaria? Tornar-se-ia outro Ser? Impossível, pois o Ser é uno. Tornar-se-ia um Não-Ser? Impossível, pois o Não-Ser é o nada. Assim, se o Ser mudasse, tornar-se-ia o nada e desapareceria.

## 3.3 Reação ao “monismo”

### 3.3.1 O Pluralismo

Parmênides lançou um problema sério sobre o dado sensorial. O *pluralismo* nasce em uma tentativa de trazer realidade ao Universo tangível. A idéia é livrar o “materialismo” dos Milesianos de sua dificuldade, o *monismo* (que é, também, uma característica da teoria de Parmênides).

Alguns *pluralistas* notáveis foram: Empédocles de Ácragas (teria vivido entre 492-432 a.C.), Anaxágoras (teria nascido em 500 a.C.), e o atomista Demócrito de Abdera (teria nascido em 460 a.C.). Contemporâneos, esses autores “pós Parmênides” não se colocam em linha sucessória de pensamento; por exemplo, o raciocínio acima, de Melisso, é posterior a Empédocles.

Empédocles liberta o “materialismo” dos Milesianos das dificuldades do *monismo*, declarando que o “vir a ser” não implica destruição “do que é”, como queria Parmênides.

O mundo sensorial resulta de combinações de quatro elementos *terra*, *água*, *ar* e *fogo*, em proporções numéricas; eles são reais e sempre existiram (Guthrie, 1962, vol.2). Existe “movimento”, mas não é preciso supor espaços vazios; a analogia apresentada foi com o movimento de um peixe que se desloca na água; porém, a analogia não parece clara, pois, para que funcione, tem-se de supor que o peixe deslize sobre a água, sem deslocá-la (Guthrie, 1962, vol.2).

Outra contribuição de Empédocles é que “movimento” pressupõe uma *causa motriz*: Os elementos acima se associam ou se dissociam por tendências naturais, respectivamente, *Amor* (poder de atração) e *Conflito* (poder de repulsão).

### 3.3.2 O Atomismo

#### Leucipo

Leucipo, provavelmente de Mileto, é um personagem controverso, pois historiadores duvidam que ele tivesse existido. De qualquer modo, no século V a.C., ou Leucipo ou outra pessoa virou ao avesso o raciocínio de Melisso, usando-o justamente para atacar o *monismo* que Melisso defendia.

Leucipo supôs que o Universo fosse constituído de uma infinidade de pequenos *plena*, invisíveis por serem pequenos; cada *plenum* é indivisível (pelo argumento de Melisso) e recebeu o nome de *indivisível* ou, o que significa o mesmo, *átomo*. A matéria do Universo é formada por esses *plena* imersos em um vácuo, pois entre dois *plena* ou há um outro *plena* ou nada. Mas Leucipo não atribuiu existência ao vácuo, só os *átomos* existem.

## COMEÇO DE BOX DE VERBETE

Plena: Plural de *plenum*, que já foi definido no texto.

## FIM DE BOX DE VERBETE

## COMEÇO DE BOX DE APROFUNDAMENTO

Uma outra formulação do argumento de Melisso seria: Se o Universo não fosse uma totalidade única (*plenum*) e fosse constituído de uma pluralidade de coisas, essas coisas seriam, cada uma, igual ao *plenum*; de fato, se cada uma das coisas não fosse, ela mesma, um *plenum*, seria uma pluralidade (pois o processo não teria fim, até que se chegasse a uma totalidade, algo não divisível).

## FIM DE BOX DE APROFUNDAMENTO

### Demócrito

Demócrito foi pupilo do suposto Leucipo e apresentou uma teoria atomista (Guthrie, 1962, vol.2). As coisas do mundo sensorial resultam de combinações de *átomos*. Os *átomos* seriam “o quê existe”; seriam indivisíveis, muito pequenos para poderem ser vistos, indestrutíveis, diferentes em tamanho e forma; um gosto amargo seria devido a átomos em gancho ou pontudos, que arranhariam a língua; sabor doce seria devido a átomos lisos; maciez, a átomos não muito bem empacotados; cores eram devidas às posições dos átomos na superfície, o que faz com que a luz incidente seja refletida de modos diferentes.

Demócrito teve de assumir um espaço vazio, para que os átomos pudessem se mover (“tivessem para aonde ir”). Os átomos mover-se-iam no espaço vazio, sem rumo, colidindo uns com os outros e, então, emaranhando-se em combinações. Com isso, ele atribui existência ao vazio.

### Atividade

Em que Heráclito e Parmênides concordam e discordam?

#### Resposta

Para Heráclito, todos os seres estão em um processo de mudança perpétua, embora perceba-se uma estabilidade nas coisas. Assim, ele mostrava a diferença entre o conhecimento oferecido pelos nossos sentidos e o proveniente do nosso pensamento. A seu turno, para Parmênides nossos sentidos é que oferecem a imagem de um mundo de mudanças sem fim, onde nada permanece igual a si mesmo e onde tudo se torna contrário a si mesmo.

Mas ambos concordam que há uma diferença entre o que sentimos e o que pensamos, ou melhor, entre perceber e pensar.

## Referências

- Guthrie, W.K.C. (1950) *The Greek Philosophers (from Thales to Aristotle)*, Methuen & Co. Ltda; republicado em 1967, 1978 (citações referem-se à publicação de 1978).
- Guthrie, W.K.C. (1962) *A History of Greek Philosophy*, 2vols, Cambridge University Press; republicado em 1978, 1985 (citações referem-se à publicação de 1985).
- Roller, Duane H.D. (1981) “Greek Atomic Theory”, *American Journal of Physics* **49**, p.206-210.



# Capítulo 4

## O ARISTOTELISMO

### Meta da aula

Apresentar a solução dada por Aristóteles ao problema do movimento. A crítica ao pensamento de Aristóteles foi essencial à formação das categorias do pensamento em Física. Essa crítica deu-se ao longo de cerca de dois milênios.

### Objetivo da aula

Informar-se dos problemas colocados por Aristóteles, os quais definiram o escopo da Filosofia Natural.

### Introdução

Aristóteles está entre os maiores pensadores que existiram. Ele responde ao problema eleático e elabora um sistema filosófico, completo e fechado, que influenciou a Europa medieval.

Até mais ou menos o século V d.C., a cultura helênica continuou a dar frutos que marcaram a história do pensamento; por exemplo, no século I, Heron de Alexandria escreveu sobre pneumática, mecânica, ótica e matemática e, no século II, Cláudio Ptolomeu escreveu o “épico” *Almagesto*, o maior (o que seu nome significa) tratado de Astronomia de toda a Antigüidade, o qual reúne a tradição astronômica até então.

O que aconteceu na Europa Ocidental Românica entre o século V e o século X deve ser procurado na história política. A esse período da história antecedeu a chamada queda do Império Romano e a divisão do mundo romano em ocidental e oriental. Do ponto de vista do pensamento em Filosofia Natural (Edward Grant, p.1-9), floresceram os enciclopedistas latinos, sobretudo compiladores, entre os quais Sêneca, Plínio (o Velho), Calcídio, Macróbio, Martiano Capella, Boécio, Cassiodoro e o Venerável Bede e outros ; esses autores preservaram muito da tradição do conhecimento, em uma época de tumulto político e social e de pouco incentivo às artes filosóficas. Mas os gregos eram estudados no Islam e traduzidos para o árabe; os autores islâmicos acrescentaram novas idéias, modificando o pensamento grego. Quando os Cristãos conquistaram a Espanha Islâmica, a partir do século XI, encontraram bibliotecas e

textos começaram a ser traduzidos para o Latim (Toledo, na Espanha, possuía uma biblioteca importante) (Roller, p.208).

No século X, um francês, Gerbert de Aurillac (946-1003), teve uma influência interessante. Ele não passaria à História com grandes contribuições ao pensamento filosófico, mas como Papa Silvério II. Essa ligação com a Igreja permitiu-lhe adquirir traduções latinas de textos árabes (Grant, p.14). Ele reuniu em torno de si estudiosos e seus pupilos continuaram o trabalho em “catedrais-escolas”, que constituíram centros de estudos, até a criação das primeiras universidades, no século XII; essas foram Colônia, Utrecht, Sens, Cambrai, Chartres, Laon, Auxerre e Rouen (Grant, p.13-14). Traduções de textos gregos para o Latim começaram a ser feitas, mas, nesse processo, deve ter havido distorções: Um texto podia ser traduzido, seja, para o Espanhol e do Espanhol para o Hebreu a daí para o Latim, sofrendo às vezes, várias traduções sucessivas (Grant, p.16).

Nesse movimento de ressurreição intelectual, os livros de Aristóteles ofereciam um sistema completo de Filosofia. A Física de hoje nasceu de uma crítica a Aristóteles, feita na chamada Alta Idade Média; essa crítica é permeada pela contribuição dos pensadores árabes, em particular Averróis, chamado *O Comentador*, por ter sido o talvez mais importante comentador de Aristóteles. A função de um professor era discutir com seus alunos interpretações de Aristóteles.

## Atividades

1. Procure, em um atlas histórico, o que aconteceu na Europa, desde a chamada “queda do Império Romano” até o século X, mais ou menos.
2. Procure, em um atlas geográfico, onde ficam as cidades européias de Colônia, Utrecht, Sens, Cambrai, Chartres, Laon, Auxerre e Rouen. Leia, em uma enciclopédia, sobre suas catedrais.

### COMEÇO DE BOX DE CURIOSIDADE

Aristóteles nasceu em 384 a.C., na cidade de Estagira, na Macedônia, distante 320 quilômetros de Atenas. Amadureceu e consolidou sua vocação de filósofo, na Academia de Platão, em Atenas, a qual teria freqüentado por cerca de vinte anos, aproveitando, muito bem, o convívio com o mestre. Foi um discípulo brilhante e, posteriormente, tornou-se professor de Retórica.

Em 343-342, Aristóteles foi chamado por um amigo de infância — Felipe da Macedônia — para ser preceptor de seu filho, o jovem Alexandre, que passaria à História com a alcunha de “o Grande”. Começou a ensinar a Alexandre, quando este tinha treze anos, porém, aos quinze anos, Alexandre abandonou a Filosofia para iniciar sua ascensão política. Conta-se que Alexandre, já homem feito e com o trono imperial assumido, teria ordenado a seus súditos que ajudassem Aristóteles a colher material botânico em um enorme espaço geográfico. Devido a essa ligação com o Império Macedônio, Com a morte de Alexandre, Aristóteles sofreu represálias sob a alegação de ter sido o mestre daquele que conquistara a Grécia. Para fugir dos inimigos, volta à Macedônia, onde sua mãe possuía alguns bens.

Aristóteles morreu em 322 a.C., poucos meses depois de se ter exilado.

### FIM DE BOX DE CURIOSIDADE

## 4.1 A solução do problema Eleático

Nas aulas anteriores, mostrou-se que o conceito de “explicar” esteve associado seja à procura de uma “substância-propriedade” ou à “forma” ou organização do Universo. Posteriormente,

Heráclito e Parmênides introduziram outra questão, a da “natureza da Natureza” ou as características da ‘realidade’, sob a forma de uma pergunta sobre a natureza das transformações observadas. Aristóteles respondeu aos dois problemas, conjuntamente. Mas para fazê-lo, introduziu novas idéias e releu velhas idéias.

#### 4.1.1 Substância

Em resposta à idéia que “vir a ser” envolve destruir “o quê é” e tornar-se “o quê não existe”, Aristóteles respondeu que dois sentidos do verbo *ser* têm de ser distinguidos, como explicado na aula 3. Por exemplo, uma coisa quente que esfria não “vem a ser” frio; “a coisa” permanece ela mesma, mudando qualidades (Guthrie, p.128). Então, inicialmente, há que existir “a coisa” concreta. O quê existe, portanto, é o objeto da experiência sensorial, este cavalo, este homem (Guthrie, p.128-129). Porém, a mesma matéria pode estar no homem ou no cavalo, por exemplo, a carne, os ossos; então é preciso uma nova distinção: O quê existe (este cavalo, este homem) é a *substância* ou *matéria informada* (com *forma*) (Guthrie, p.129). Isso leva ao conceito de *forma*.

#### 4.1.2 Forma (ser atual) versus ser potencial.

A *forma* de uma coisa é a verdade última da coisa, sua natureza ou essência, o que a coisa é, seu *ser real ou atual*.

O conceito de *ser em potência* aparece em oposição ao conceito de *ser atual*; de modo simplificado (E. J. Dijksterhuis, p.20): “Um ser é potencialmente o em quê pode se tornar e é em atualidade o que é”; por exemplo, uma semente é, potencialmente, uma árvore.

#### 4.1.3 Transformação (movimento).

Uma *transformação* pode ser entendida, de modo simplificado, como “passagem” do *ser em potência* para o *ser atual*; embora essa definição seja circular, pois “passagem” já traz a idéia de movimento, ela descreve razoavelmente a intensão. No caso do exemplo, por ser potencialmente uma árvore, a semente transforma-se (move-se) em árvore, seu *ser atual*.

#### 4.1.4 As quatro causas do ‘movimento’.

*Causa formal*: As coisas movem-se, portanto, por uma tendência inata, porque existe um *ser atual* que têm a potencialidade de ser. Essa é a *causa formal* do movimento.

*Causa eficiente*: É a causa imediata, externa, do movimento. Por exemplo, uma pedra sendo segura a uma distância do solo; ela tem “tendência” de cair, por sua natureza, mas para que isso aconteça, a mão que a segura tem de se abrir e deixá-la cair. Uma semente transforma-se em árvore, porque houve chuva, o solo era apropriado, etc.

*Causa material*: É a *matéria informada* ou *substância* de que é feita a coisa. Uma pedra não teria tendência de cair, se não fosse feita da substância *terra*; por exemplo, se a substância da pedra fosse *fogo*, ela subiria, como faz a fumaça, em vez de cair.

*Causa final*: Toda *transformação* (*movimento*) tem um propósito. De modo geral, esse propósito é a realização da *forma* ou *ser atual* (Dijksterhuis, p.41).

Somente um *ser perfeito* pode permanecer imutável e incorruptível; sendo “perfeito”, ele não contém “potencialidades”, é *ato puro* e não precisa sofrer transformação (Guthrie, 1950, p.136). Portanto, *movimento* é associado à *imperfeição* e à *corruptibilidade*, não realização do *ser atual*; por extensão, *perfeição* é associada à *imutabilidade* e à *incorruptibilidade*.

## 4.2 O deslocamento ou movimento local



Figura 4.1: **Universo Aristotélico.** A Terra está no centro do Universo. Os planetas giram em torno dela, na seguinte ordem: Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno. A última esfera é a das estrelas.

### 4.2.1 As causas do movimento local natural.

O *movimento local* (como todas “transformações”) precisa de causas; ele não pode ser auto-inflingido, uma coisa não pode ser a causa de seu movimento, pois seria, simultaneamente, *ser atual* e *ser potencial* (Guthrie, p.136). Essas causas são encontradas na *forma*, na *matéria informada*, no conceito de *lugar natural* e em uma causa externa.

Aristóteles define a *substância* do mundo natural. Ele adota a teoria dos quatro elementos de Empédocles, mas a fundamenta em um conjunto de qualidades; essas qualidades devem afetar o tato, serem capazes de causar mudanças qualitativas e serem opostas duas a duas; ora, dentre os elementos propostos por Empédocles, as possíveis combinações são (Dijksterhuis, p.22):

elemento	propriedade predominante	a outra propriedade
terra	seca	fria
água	fria	úmida
ar	úmido	quente
fogo	quente	seco

No quadro, os elementos aparecem misturados e existe um predominante, o da coluna da esquerda; o não predominante é o da coluna da direita, o qual é igual ao predominante da linha imediatamente abaixo. Essas são as *substâncias* que compõem o mundo sensorial.

A cada elemento está associada uma *forma* ou essência: A *terra* é *pesada* e o *fogo* é *leve*; os outros dois são intermediários: Água é leve na *terra* e pesada no *ar* e no *fogo*; *ar* é leve na *água* e na *terra* e pesada no *fogo*. A *causa final* do movimento é provida pelo conceito de *lugar natural*: O dos corpos *pesados* é o centro do Universo; o da *água*, o do *ar* e o do *fogo* são, respectivamente, esferas concêntricas, centradas no centro do Universo, com raios crescentes na ordem água, ar, fogo; o *lugar natural* é, pois, onde a coisa realiza seu *ser atual*, portanto, uma vez em seu *lugar natural*, os corpos permanecem imutáveis.

#### 4.2.2 O movimento natural dos corpos celestes.

Aos corpos celestes foi atribuído um movimento natural *circular uniforme*, em torno do centro do Universo, na ordem: Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter, Saturno; as estrelas são pontos em uma última esfera, a oitava, fechando o Universo. Dentro do esquema conceitual, é preciso postular um novo tipo de matéria, à qual corresponderia um movimento circular uniforme — o *éter*.

Porém, existe uma diferença entre o movimento circular uniforme dos corpos celestes e os outros movimentos naturais: Os astros percorrem sempre o mesmo círculo e, nesse sentido, “estão sempre no mesmo lugar”; portanto, o movimento dos corpos celestes pode ser considerado *imutável*. Correspondentemente, é atribuído ao *éter* a propriedade de ser *perfeito* e aos objetos celestes perfeitos deve corresponder o movimento perfeito. O Universo foi, por sua vez, dividido em *sublunar* e *supra-lunar*: Aquele é corruptível (isto é, acaba, morre), mutável e imperfeito; esse, incorruptível, imutável e perfeito.

##### COMEÇO DE BOX DE APROFUNDAMENTO

Um leitor do século XXI reconhece, aqui, a *simetria esférica*. Uma esfera, girando em torno de um de seus eixos (seja a linha norte-sul), permanece sempre igual a ela mesma.

##### FIM DE BOX DE APROFUNDAMENTO

Ora, se os astros já se encontram em seu *lugar natural*, eles deveriam permanecer imutáveis; por que, então, inventar um *movimento perfeito*? A resposta admite uma componente observacional. Os astros são observados mover-se de leste para oeste. O movimento dos astros era explicado, atribuindo a eles movimentos circulares e uniformes (deve-se mencionar que essa Astronomia não é, ainda, a de Cláudio Ptolomeu, que será o assunto da aula 8): Supunha-se que cada esfera girasse em torno de um eixo, cada uma tendo seu eixo de rotação e cada uma com diferente velocidade de rotação; uma esfera, ao girar, arrastaria a esfera imediatamente abaixo; o movimento observado de um planeta seria a composição do movimento de sua esfera e das esferas acima dele. É fato sabido que Aristóteles conhecia o trabalho astronômico de sua época, feito em seu Liceu. Aristóteles, obviamente, está livre para atribuir “realidade” a esses movimentos, já que, no quesito “realidade dos movimentos”, ele se libertou de Parmênides. Mas, mesmo que a Astronomia aponte para a atribuição de movimento aos astros, o que causa o movimento da oitava esfera?

As “potencialidades” miram uma “perfeição”, portanto as “transformações” no Universo fazem-se por comparações com um “bem melhor do que” (Guthrie, p.131); extrapolando (Guthrie, p.131), “se existe um bem melhor deve existir o melhor”, um padrão absoluto de comparação; esse é o *Primeiro Movedor*. Ele é “ato puro” (Guthrie, p.136), “[...] eterno e perfeito, ele não contém elementos de potencialidades não realizadas e não pode sofrer movimento no sentido filosófico, o qual é o progresso de potencialidade a atualidade”. Ele não pode mover a oitava esfera, pois sendo *ato puro*, não há nada que tenha deixado de realizar (Dijksterhuis, p.35). Porém, o *Primeiro Movedor* é o modelo de perfeição externo e, por sua mera presença “ativa” as potencialidades da Natureza que o tentam imitar (Guthrie, p.). A oitava esfera move a si mesma por aspirar à perfeição do *Primeiro Movedor*. O Universo é, pois, movido por “Inteligências” ou idéias de perfeição que motivam o desejo de tornar-se perfeito.

### 4.2.3 Movimentos locais, naturais e violentos (sub-lunares).

A cada *lugar natural* foi associado um tipo de movimento local natural: Aos corpos *pesados* corresponde um movimento natural em *linha reta, para baixo*, em direção ao centro do Universo; aos corpos *leves (fogo)*, um movimento natural *linha reta, para cima*, em direção à sua esfera; os elementos intermediários, analogamente: à *água*, quando na *terra*, corresponde um movimento natural para *cima* e, quando no *ar*, para *baixo*; ao *ar*, quando na *terra* ou na *água*, corresponde um movimento natural para *cima*, mas, quando no *fogo*, para *baixo*. Em particular, a Terra, por ser pesada, caiu para o centro do Universo, há eras; contrariamente ao que se diz popularmente, não é o centro do Universo que foi colocada na Terra, ela é que “caiu” para o centro do Universo.

**Movimento violento (sub-lunar).** É o que não é natural.

#### Atividade

Qual a teoria de Aristóteles sobre ‘mudança’ ou ‘movimento’?

##### Resposta

Ao contrário de Parmênides, Aristóteles nega que o movimento e o Não-Ser sejam a mesma coisa. Ele diferencia os seres conforme estejam ou não em movimento.

## 4.3 O problema da causa que mantém o movimento

### 4.3.1 Definição do problema

As causas do movimento já foram apresentadas; mas para que um corpo se mantenha em deslocamento, uma causa deve estar sempre presente e não somente no instante inicial do movimento. Um corpo em movimento local é empurrado ou puxado por “algo”; esse “algo” estaria sempre em contato com o corpo (não existia a idéia de ação a distância), mas não é parte da natureza do corpo. O problema é, então, identificar esse “algo”, chamado, na Idade Média, de *motor conjunctus* (Dijksterhuis, p.24-25).

### 4.3.2 O ar

Aristóteles atribuiu ao meio — o ar — a capacidade de empurrar o corpo; o movimento não natural ou *violento* é, então, explicado: No caso de uma pedra lançada (projétil), o movimento inicial seria proveniente de quem a atirou; esse movimento seria transmitido à camada de ar subjacente, que, então, empurraria a pedra e transmitiria movimento à camada seguinte e, assim, sucessivamente. nas palavras de Aristóteles (*apud* Allan Franklin, p.530):

[...] o ar que foi empurrado [pela mão de quem atirou a pedra] empurra [as coisa atiradas] com um movimento mais veloz do que a locomoção natural do projétil, pela qual ele move a seu lugar apropriado [natural].

Uma outra explicação foi criada, muito provavelmente, na Idade Média; é a *antiperístasis* (Franklin, p.530): Quando um corpo se move, o meio (ar) corre para trás do corpo para evitar a formação de um vácuo e empurra o projétil. Aristóteles não poderia propor essa resposta, pois o vácuo era, para ele, algo tão inimaginável quanto um círculo quadrado, isto é, era uma contradição lógica.

#### Atividade

Pesquise no Dicionário de Filosofia de Abbagnano sobre o movimento e o lugar natural dos quatro elementos de Aristóteles.

#### Resposta

Cada um dos quatro elementos teria o seu próprio lugar e o movimento era somente uma tentativa por parte desses elementos de voltarem ao seu lugar natural. O movimento era um caso particular da mudança. A terra estaria abaixo, a água acima desta, o ar acima da água e o fogo estaria acima de todos os demais. Portanto, Aristóteles explicava que um elemento densamente formado por terra, como uma rocha, cai espaço abaixo, enquanto que as bolhas de ar na água movem-se líquido acima, a chuva cai e o fogo se eleva.

## 4.4 Descrição do movimento local

Aristóteles parte do princípio que dois fatores determinam a celeridade dos corpos, sua grandeza ou “peso” e o meio. Nas palavras de Aristóteles (*Physica*, p.295, 215a e 216a; *apud* Franklin, p.530):

Nós vemos o mesmo peso ou corpo movendo mais rapidamente do que outro, por duas razões, seja porque há uma diferença naquilo por onde move [o meio], como entre água, ar e terra, seja porque, outras coisas sendo iguais, um corpo movente difere de outro devido ao excesso de peso ou leveza.

Aristóteles nunca escreveu uma fórmula, nem poderia, pois o mundo sub-lunar não era matematizado, somente o movimento dos astros. Entretanto, para facilitar o entendimento das idéias, historiadores interpretaram os dizeres de Aristóteles assim:

$$\begin{array}{ll} \text{movimento natural:} & v \propto \frac{W}{R} \quad W > R \\ \text{movimento violento:} & v \propto \frac{F}{R} \quad F > R \end{array}$$

onde  $v$  é a “velocidade” da queda;  $W$ , o “peso”;  $F$ , “força”;  $R$ , a “resistência”. Esses termos não podem ser entendidos em seu sentido moderno: “Velocidade” é mais bem entendida como simples celeridade ou rapidez, sem indicar “espaço percorrido em um tempo”; “peso” designa a simples “tendência natural” de queda dos corpos pesados, que difere, segundo Aristóteles, de corpo a corpo; “força” deve ser entendida como o “esforço” para se lançar um projétil ou o “esforço” para se puxar ou empurrar algo; “resistência” é um conceito suficientemente vago para incluir, em termos modernos, tanto uma resistência do meio, quanto a inércia dos corpos; nas citações baixo, ‘densidade’ de um meio é para ser entendida como um meio mais espesso ou menos espesso, pois não havia o conceito de  $\lim \frac{\Delta M}{\Delta V}$ . São apresentadas duas fórmulas, pois  $W$  e  $F$  são conceitualmente diferentes: Aquele é uma tendência natural, esse, uma “violência”. Nas palavras de Aristóteles (Physica, p.295, 215a):

Ora, o meio causa uma diferença, porque ele impede a coisa movente, [...]; e especialmente um meio que não é facilmente divisível, isto é, um meio que é de algum modo denso. [O corpo]  $A$  moverá através do [meio]  $B$ , no tempo  $\Gamma$  e, através [do meio]  $\Delta$ , o qual é mais rarefeito, no tempo  $E$  (quando o comprimento de  $B$  é igual ao de  $\Delta$  [as distâncias percorridas são iguais]), em proporção à densidade do corpo que resiste [essa “densidade” é o  $R$  da fórmula]. Pois seja  $B$  a água e  $\Delta$ , o ar; então, pela mesma quantidade pela qual o ar é mais rarefeito e mais incorpóreo que a água,  $A$  move mais rapidamente através de  $\Delta$  do que de  $B$  [1, abaixo]. Deixe, então, que as celeridades tenham a mesma proporção que [a densidade do] ar tem com a [densidade da] água [2, abaixo]. Então, se o ar é duas vezes mais rarefeito, o corpo percorre  $B$  em duas vezes o tempo em que percorre  $\Delta$  e o tempo  $\Gamma$  será duas vezes o tempo  $E$  [3, abaixo].

De novo, Aristóteles não matematiza, mas tentar dar forma algébrica a esse argumento ajuda a leitura:

afirmativa 1.  $\Delta v = v_{\text{ar}} - v_{\text{água}} \propto R_{\text{água}} - R_{\text{ar}} = \Delta R \implies \frac{R_{\text{ar}}}{R_{\text{água}}} \propto \frac{v_{\text{água}}}{v_{\text{ar}}}$ .

afirmativa 2.  $\frac{R_{\text{ar}}}{R_{\text{água}}} \propto \frac{v_{\text{água}}}{v_{\text{ar}}}$ .

afirmativa 3.  $t \propto \frac{1}{v} \implies \frac{R_{\text{ar}}}{R_{\text{água}}} \propto \frac{v_{\text{água}}}{v_{\text{ar}}} \propto \frac{t_{\text{ar}}}{t_{\text{água}}}$ .

Aristóteles entendeu que, se  $R > W$  ou  $R > F$ , não pode haver movimento, pois, se assim fosse, (Franklin, p.530) “um [único] homem poderia mover um navio”; parafraseando o argumento, uma distância percorrida é divisível em tantas partes quanto se queira; também o é a potência motriz que move o navio; portanto, dividindo a distância e a potência pelo número de homens no mundo, a cada homem corresponde uma potência motriz e uma distância para essa potência motriz, não importa quão pequenas ambas possam ser.

## Atividade

Procurar, em um dicionário de Filosofia, como Aristóteles emprega a idéia de movimento para distinguir os diferentes tipos de seres.

### Resposta

Aristóteles diferenciava os seres conforme seus movimentos e repouso, investigando através da metafísica o que é a essência e aquilo que faz com que haja essências particulares, como:

1. A essência dos seres físicos ou naturais, que estão em movimento;
2. A essência dos seres matemáticos, que estão imóveis porque não existem em si mesmos, mas somente nas formas dos elementos naturais;



3. A essência de seres imutáveis ou imóveis, como os astros que não nascem, não se transformam, não morrem, mas realizam um movimento local perfeito;
4. A essência do ser divino, eterno, imutável, imperecível, sempre idêntico a si mesmo, perfeito e imaterial, do qual o movimento está excluído e que é conhecido apenas pelo intelecto.

## 4.5 O problema do vácuo

O Universo de Aristóteles não apresenta espaços vazios, pois ele supunha que o vácuo não existisse. A razão para isso recua longe no tempo. Como já se viu, era difícil para os gregos entender o “nada”, pois o que pode existir é a matéria e o vácuo — enquanto ausência de matéria — é, de certo modo, uma espécie de “nada”; Aristóteles, apesar de ter respondido ao problema de Parmênides e ter entendido a diferença entre “ser” e “estar”, admitiu que o existente é o mundo tangível. Várias razões foram apresentadas para negar ‘realidade’ ao vácuo:

1. Para Aristóteles, o vácuo era uma contradição lógica. Para definir o vácuo, é preciso determinar seu *lugar*; ora, *lugar* de uma coisa era definido como (Dijksterhuis, p.37) “a primeira fronteira imóvel do corpo continente, i.e., no caso de um navio em um rio, as margens e o leito do rio”; portanto ‘vácuo’ não pode existir sem colocá-lo na matéria, o que o faria deixar de existir.

### COMEÇO BOX EXPLICATIVO

**Os Princípios Racionais:** Desde seus primórdios, a Filosofia considera que o conhecimento racional obedece a certas regras fundamentais do pensamento, ou seja, a razão opera seguindo certos princípios que a própria razão estabeleceu; portanto, esses princípios também garantem que a realidade é racional, no sentido de ser passível de ser entendida. Essas regras são respeitadas, mesmo que seu emprego se possa se dar sem que o usuário se dê conta; os “homens” as respeitam, porque são seres racionais. Elas são:

1. **Princípio da Identidade:**  $A$  é  $A$  ou *o que é, é*. O princípio afirma que uma coisa, seja ela qual for, por exemplo, um ser da Natureza, uma figura geométrica, uma obra de arte, uma ação, etc., só pode ser conhecida e pensada, se for percebida e conservada com sua identidade. O *princípio da identidade* é condição para que as coisas possam ser definidas e conhecidas a partir de suas definições.
2. **Princípio da Não-contradição:**  $A$  é  $A$  e é impossível que seja, ao mesmo tempo,  $\neg A$  (não- $A$ ). Assim, é impossível que a árvore que está diante de mim seja e não seja uma mangueira; que o triângulo tenha e não tenha três lados; que o homem seja e não seja mortal; etc. Sem o princípio da não-contradição, o princípio da identidade não poderia funcionar. O princípio afirma que uma coisa ou uma idéia não pode negar a si mesma;  $A$  e  $\neg A$  são coisas ou idéias contraditórias e, de acordo com o princípio, são simultaneamente impensáveis e impossíveis.
3. **Princípio do Terceiro Excluído:** Ou  $A$  é  $x$  ou  $A$  é  $\neg x$  e não há terceira possibilidade. Por exemplo: “Ou este homem é Sócrates ou não é Sócrates”. Este princípio define a decisão de um dilema — “ou isto ou aquilo— e exige que apenas uma das alternativas seja verdadeira. Mesmo quando temos, por exemplo, um teste de múltipla escolha, escolhe-se, na verdade, apenas entre duas opções, “ou isto está certo ou está errado”; não há terceira possibilidade ou terceira alternativa, pois, entre várias escolhas possíveis, só há, realmente, duas, a certa e a errada.
4. **Princípio da Razão Suficiente:** “Tudo o que existe e tudo o que acontece tem uma razão, causa ou motivo para existir ou para acontecer; além disso, é pressuposto que tal causa pode ser conhecida pela nossa razão”. Ou “dado  $A$ , necessariamente se dará  $B$ ” ( $A \implies B$ ); ou: “Se  $A \implies B$ , dado  $B$ , necessariamente houve  $A$ ” (indução). O *Princípio da Razão Suficiente* costuma ser chamado de *Princípio de Causalidade* para indicar que a razão afirma a existência de relações ou conexões internas entre as coisas, entre fatos, ou entre ações e acontecimentos. Isso não significa que a razão não admita o acaso

ou ações e fatos acidentais, mas sim que ela procura, mesmo para o acaso e para o acidente, uma causa. A diferença entre a causa (ou razão suficiente) e a causa acidental está em que a primeira se realiza sempre, é universal e necessária, enquanto a causa acidental só vale para aquele caso particular, para aquela situação específica, não podendo ser generalizada e ser considerada válida para todos os casos ou situações iguais ou semelhantes, justamente porque o caso ou a situação são únicos.

#### FIM BOX EXPLICATIVO

2. Outro argumento contra o vácuo é que, se existisse, levaria a uma contradição com a fórmula acima para o movimento; essa contradição é: No vácuo,  $R = 0$ , logo  $v \rightarrow \infty$ , portanto, todos os corpos cairiam igualmente, isto é, instantaneamente e com celeridade infinita, em contradição com o fato de que corpos mais pesados caem mais rapidamente; nas palavras de Aristóteles (*Physica*, 216a, p.295; *apud* Franklin, p.530):

Nós vemos que os corpos que têm um impulso maior, seja de peso ou leveza, se são iguais em outras considerações, movem-se mais rapidamente ao longo de um espaço igual e na proporção que suas grandezas têm entre si. Portanto, eles se movem através do vácuo com essa proporção de celeridade [ $v \propto \frac{p}{R}$ ]. Mas isso é impossível; pois por que deveria um de mover mais rapidamente [no vácuo]? (Ao mover através dos *plena*, deve ser assim, pois o maior divide [os *plena*] mais rapidamente por sua força [o peso]. Pois uma coisa em movimento corta o meio seja pela forma, seja pelo impulso que o corpo [...] possui). Portanto todos [os corpos] possuem igual celeridade. Mas isso é impossível.

3. Posto em conceitos modernos, um outro argumento para negar o vácuo é que o vácuo apresenta as propriedades de simetria erradas; em outras palavras, o movimento no vácuo seria inercial.

No vácuo, não há *lugar natural*, pois cada região seria igual a qualquer outra região e não haveria *lugar natural*; em linguagem dos Físicos do século XXI, o vácuo é *homogêneo e isotrópico*. Não havendo *lugar natural*, não existe razão para que um corpo, uma vez em movimento, pare em um lugar em vez de parar em outro. O movimento seria, então, eterno e (*ad infinitum*), o que não é possível em um *Universo* fechado e finito, como o de Aristóteles. Nas palavras de Aristóteles (*Physica*, 215a; *apud* Franklin, p.530):

[...] ninguém diria que uma coisa uma vez colocada em movimento deveria parar em algum lugar; pois por que deveria parar *aqui* em vez de *ali*? De forma que uma coisa ou está em repouso ou deve mover *ad infinitum*, a menos que algo mais poderoso se ponha em seu caminho.

### Atividade

Qual a opinião de Aristóteles sobre o espaço, se vazio ou não?

#### Resposta

Aristóteles não aceitava a idéia de vácuo. Portanto, correspondentemente, o espaço era um *plenum*. Ele também não aceitava o atomismo de Demócrito.

## Referências

Aristóteles (séculos IV-III a.C.) *Physics*, , in: R.M. Hutchins (editor) (1952) *Great Books of the Western World, Encyclopædia Britannica*, 54 vols, vol.8.

- Barraclough, Geoffrey (ed.) (1995) *Atlas da História do Mundo*, 2 vols., Folha de São Paulo.
- Dijksterhuis, Eduard Jan (1959) *The Mechanization of the World Picture*, 1959. Traduzido para o Inglês por C. Diskhoorn, Oxford University Press, 1961, 1969; Princeton University Press, 1986 (citações são dessa edição).
- Franklin, Allan (1976) “Principle of Inertia in the Middle Ages”, *American Journal of Physics* **44**, 529-544.
- Grant, Edward (1977) *Physical Science in the Middle Ages*, Cambridge University Press.
- Guthrie, W.K.C. (1950) *The Greek Philosophers (from Thales to Aristotle)*, Methuen & Co. Ltda; republicado em 1967, 1978 (citações referem-se à publicação de 1978).
- Roller, Duane H.D. (1981) “Greek Atomic Theory”, *American Journal of Physics* **49**, p.206-210.

## Capítulo 5

# CRÍTICAS A ARISTÓTELES (ATÉ O SÉCULO XIII)

### Meta da aula

Apresentar críticas sofridas pelo aristotelismo que foram importantes no estabelecimento de categorias da Física.

### Objetivo da aula

Informar-se dos argumentos contra ou pró a Filosofia Natural de Aristóteles e como, deles, novas categorias vão sendo formadas.

### Introdução

Aristóteles propôs problemas que foram discutidos por vários autores, islâmicos e cristãos, que se pronunciaram, independentemente de etnia e religião, ora a favor, ora contra Aristóteles. As discussões, que aconteceram, sobretudo, nos séculos XIII e XIV, acrescentaram inovações que prepararam o caminho para a formação, séculos depois, das categorias do que se tornará “a Física”. Além disso, nesses séculos muitos teólogos estudaram a Filosofia Natural para fundamentar a Teologia e, eles também, contribuíram para o pensamento em Filosofia Natural; entre eles Tomás de Aquino, um santo homem, e William de Ockham (Guilherme de Occam).

### 5.1 A ação do meio.

Um dos importantes críticos de Aristóteles foi João Filopono (final do século V d.C.-começo do século VI d.C.). Inicialmente, Filopono responde ao argumento que, no vácuo, o tempo seria infinito. Nas palavras de Filopono (*apud* Franklin, p.531):

Se uma pedra move a distância de um estádio através do ar e o corpo não está no começo e no fim do estádio no mesmo instante, um tempo definido será requerido, [...], para percorrer do começo

da distância a seu fim (pois, como indiquei, o corpo não está nas duas extremidade ao mesmo tempo) e isso seria verdadeiro mesmo se o espaço percorrido estivesse em um vácuo.

#### COMEÇO BOX EXPLICATIVO

‘Estádio’ é uma unidade de medida de distância.

#### FIM BOX EXPLICATIVO

O papel do meio é acrescentar um tempo (*apud* Franklin, p.531):

Mas um *tempo adicional* é requerido, por causa da interferência do meio. Pois a pressão do meio e a necessidade de cortar através dele torna o movimento através do meio mais difícil.

Filopono propõe que, ao invés de  $v \propto \frac{W}{R}$  e de  $v \propto \frac{F}{R}$ , seja, respectivamente,  $v \propto W - R$  e  $v \propto F - R$ . Nas palavras de Filopono (*apud* Franklin, p.531):

Se uma pedra move a distância de um estádio através do vácuo, haverá, necessariamente, um tempo, seja, uma hora. Mas se nós supusermos essa distância de um estádio preenchida com água, [...], um certo tempo adicional será necessário, por causa da resistência do meio. Suponha que, para a divisão da água, um outra hora seja requerida, de modo que o mesmo peso cobre a distância através do vácuo em uma hora e, através da água, em duas. Ora, se se rarefaz a água, mudando-a em ar, e, se o ar tiver metade da densidade da água, o tempo que o corpo consumiu par dividir a água será proporcionalmente reduzido. No caso da água, o tempo adicional foi uma hora. Portanto, o corpo moverá a mesma distância, no ar, em uma hora e meia.

Comparando o argumento de Aristóteles e o de Filopono:

Aristóteles:	$v_{\text{ar}} - v_{\text{água}} \propto R_{\text{água}} - R_{\text{ar}}$	$\frac{v_{\text{ar}}}{v_{\text{água}}} \propto \frac{R_{\text{água}}}{R_{\text{ar}}}$ .
Filopono:	$\Delta t_{\text{meio}} \equiv t_{\text{meio}} - t_{\text{vácuo}} \propto R_{\text{meio}}$ $\Delta t_{\text{água}} - \Delta t_{\text{ar}} \propto \frac{R_{\text{água}}}{R_{\text{ar}}}$	$v_{\text{vácuo}} - v_{\text{meio}} \propto R_{\text{meio}}$ $v_{\text{ar}} - v_{\text{água}} \propto \frac{R_{\text{água}}}{R_{\text{ar}}}$

Ora, no vácuo,  $R = 0$  e  $v_{\text{vácuo}} = W$ ; cada corpo cai com seu “impulso natural”. Mas, se o movimento no vácuo se torna possível, qual é, então, o *motor conjunctus*? Para Aristóteles, era o meio.

## 5.2 A manutenção do movimento. A “força” impressa

Filopono resolve o problema da manutenção do movimento, no movimento *violento*, assumindo que (Franklin, p.532):

[U]ma força motriz incorpórea é posta no projétil pelo projetor e que o ar colocado em movimento contribui ou nada ou muito pouco ao movimento do projétil.

Essa idéia é comentada por Avicenna (980-1037), que propõe uma força persistente (*apud* Franklin, p.532):

E há aqueles que mantêm que a causa [do movimento se manter] está naquela força que o movente adquire do movedor e a qual persiste nele [o corpo] por um tempo, até ser abolida pela força oposta do (meio) que o toca e é deslocado por ele. E, como a força é enfraquecida no projétil, assim a inclinação natural (*mail*) [inclinação natural: movimento natural para baixo] e a ação da fricção se tornam dominante sobre ele e, assim, a força é abolida e, conseqüentemente, o projétil passa para a direção de sua inclinação natural.

O enfraquecimento dessa força parece ser devida ao meio, pois Avicenna admite que, no vácuo, ela persiste:

Se o movimento violento do projétil é produzido por uma força operando no vácuo, ele deve persistir, sem aniquilação ou qualquer tipo de interrupção.

A questão permanece de como explicar a manutenção do movimento no caso do movimento *natural*. Avempace (1106-1138) critica Aristóteles com os seguintes argumentos:

(i) Inicialmente, Avempace parece defender  $v \propto W - R$ :

[...] a razão do poder coesivo da água para o daquele na água está como a razão da retardação sofrida pela coisa movente, devido ao meio [...].

(ii) Para Avempace, a suposição do meio como suporte do movimento torna qualquer movimento, inclusive o natural, em violento (Franklin, p.533):

Pois, se o que certos pensadores acreditam fosse verdadeiro, então o movimento natural seria violento. [...] [S]e não há resistência presente, como pode haver movimento? Pois ele seria necessariamente instatâneo. Além disso, o que poderia ser dito dos corpos celestes? Nenhuma resistência existe ali, pois não há nenhuma divisão ali e o lugar de um círculo é sempre o mesmo, de modo que [o corpo celeste] não abandona um lugar para entrar em outro. Portanto, seria necessário que que o movimento circular ocorresse instantaneamente. No entanto, observamos [nos movimentos circulares dos corpos celestes] as maiores vagarosidades, como no caso do movimento dos astros fixos, e, também, as maiores velocidades, como no caso da rotação diurna.

E isso é, somente, devido a uma diferença em perfeição entre o movedor e a coisa movida. Portanto, quando o movedor tem mais perfeição [em comparação com o movido], o que é movido por ele será mais rápido; e, quando o movedor tem menos perfeição, ele estará mais próximo [em perfeição] com a coisa movida e o movimento será mais lento.

O ponto do argumento é que, se  $R = 0$ , então  $v \propto W$ , o que significa que o corpo cai por sua natureza (peso) e não há necessidade de um movedor externo, a menos que a natureza fosse externa ao corpo; e Avempace apresenta um exemplo “observacional”, o movimento celeste.

Esse argumento de Avempace foi criticado por Averróis (1126-1198), que defende Aristóteles. Para Averróis (Ernest Moody, p.231), Avempace confunde o agente “externo” com sua natureza, separando, assim, o corpo (o movente) e sua essência. Do ponto de vista da interpretação de Aristóteles, Averróis está, provavelmente, certo, pois o movente (o corpo) é “matéria informada”; mas o que está em jogo é uma correção a Aristóteles, ainda que usando estruturas conceituais aristotélicas.

## 5.3 Tomás de Aquino e a geometrização do movimento

### COMEÇO DE BOX DE CURIOSIDADE

Tomás de Aquino foi um teólogo. Muitos teólogos usaram a Filosofia Natural para fundamentar a Teologia. Ele dizia, por exemplo, que a Bíblia foi escrita em linguagem metafórica; mas foi canonizado! Provavelmente, os conflitos entre Igreja e ciência, que já se delineavam um pouco após a morte de Aquino, foram alimentados por dissidências internas à Igreja.

### FIM DE BOX DE CURIOSIDADE

Tomás de Aquino (1225-1274) alinha-se com Avempace e com Filopono, aceitando que  $v \propto W - R$  (*apud* Franklin, p.534):

Mas é verdadeiro que, em virtude de algum impedimento (ou meio resistente) algo deva ser subtraído dessa velocidade. [...]. Mas é necessário que a razão da retardação [em um meio] esteja para a retardação [em outro meio] como a resistência do [primeiro] meio para a resistência do [segundo] meio.

Porém, ele geometriza o problema:

1. Inicialmente, ‘resistência’ é a grandeza geométrica do corpo, seu tamanho (*apud* Moody, p.343):

Em corpos pesados e leves, se a forma que lhes é dada por aquilo que os gerou for removida, permanecerá, para o pensamento, o corpo extenso; e isso, pelo próprio fato de que é uma magnitude, existindo em uma posição oposta [isto é, em oposição ao movimento], terá resistência com respeito ao movedor. Pois nenhuma resistência pode ser entendida nos corpos celestes com relação a seu movedor.

2. Aquino argumenta que não se segue que, no vácuo,  $v \rightarrow \infty$ : Para ele, todo movimento tem uma velocidade (celeridade). O resultado é fundamentado em um “fato observacional” e em um “apelo à razão” (argumento lógico, racional).

(i) O “apelo à razão” geometriza o movimento: Se a distância percorrida for finita, o tempo para percorrê-la será, da mesma forma, finito, não importa se a distância esteja em um vácuo ou em um meio. Nas palavras de Aquino (*apud* Franklin, p.534):

Um apelo à razão é o seguinte: Do mesmo modo que existe um antecedente e um posterior em uma grandeza percorrida por um movimento, assim também nós entendemos que, no próprio movimento, há um antecedente e um posterior. Disso se segue que movimento acontece em um tempo definido.

(ii) O exemplo é o mesmo já invocado por Avempace, o movimento dos corpos celestes. Nas palavras de Aquino (*apud* Franklin, p.534):

Um exemplo é o dos corpos celestes, cujos movimentos não são impedidos por nada e, no entanto, eles têm uma velocidade [celeridade] definida em um tempo definido.

## 5.4 O Édito de Tempier

Em 1277, Eugène Tempier, Bispo de Paris, emitiu um Édito, no qual condenou 219 teses da Filosofia Natural, pois essas teses limitavam o poder de Deus. Em particular, a tese de número 49 diz que (Franklin, p.534; Grant, p.27-29) : *Deus não pode mover os céus com movimento retilíneo; e a razão é que um vácuo permaneceria*. Ora, se o vácuo fosse uma impossibilidade lógica, como queria Aristóteles, não haveria porque se preocupar com essa tese, pois Deus, apesar de poderoso, não cria inconsistências (Grant, p.29). A tese só ameaçaria o poder de Deus, se o vácuo pudesse ser pensado, deixasse de ser uma inconsistência lógica. Portanto, se o Bispo está preocupado com a tese, é porque o vácuo não é uma impossibilidade lógica, é pensável. Historiadores consideram que escolares medievais entenderam que a Igreja, ao proibir a tese, indicava que, do ponto de vista teológico, o vácuo era possível, e, portanto, passaram, eles também, a discutir o vácuo como algo possível (Grant, p.27).

Alguns filósofos medievais, quando confrontados com contradições entre a Filosofia natural aristotélica e os dogmas da Igreja, passaram a adotar a *doutrina da dupla verdade* (Grant, p.25-26); segundo a doutrina, uma tese pode ser verdadeira no contexto da Filosofia Natural e falsa no contexto da Teologia; nesse caso, vale a “verdade revelada”(o Bispo de Paris também rejeitou essa doutrina (Grant, p.27)). Isso levou a um **ceticismo filosófico**; por esse nome designa-se filosofias que mantêm a impossibilidade de estabelecer a verdade do conhecimento. No século XIV, a verdade da Filosofia Natural foi tida como *contingente*, mas não absoluta, pois Deus poderia sempre alterar o mundo, as coisas poderiam ter sido feitas de modo diferente ou não terem sido feitas (Grant, p.29). Uma consequência desse cenário epistemológico é que não faz sentido perguntar pelo “ser oculto” das coisas, sua *forma* ou essência; o terreno é fértil para germinar um *empiricismo* radical, em que só o observado pode ser real e relações de causa-efeito são, apenas, contingentes.

### Atividade

Procure, em um dicionário de Filosofia, o que é *nominalismo* e os autores associados a essa corrente filosófica medieval.

### Atividade

Qual é o argumento de Filopono?

#### Resposta

Para distâncias finitas, tempos finitos, não importa se a distância esteja no meio ou não.

### Atividade

O “fato observacional” citado por Aquino e Avempace é, de fato, um fato observacional?

#### Resposta.

Depende do que é para ser observado. Os epistemólogos dizem que “todo experimento é carregado de teoria”, isto é, o que observar, saber o que está sendo observado, saber se o aparelho realmente observa o que deve ser observado, etc., são coisas que dependem de uma teoria.



## Referências

- Franklin, Allan (1976) “Principle of Inertia in the Middle Ages”, *American Journal of Physics* **44**, 529-544.
- Grant, Edward (1977) *Physical Science in the Middle Ages*, Cambridge University Press.
- Moody, Ernest (1975) “Galileo and Avempace: The Dynamics of the Leaning Tower Experiment”, in: *Studies in Medieval Philosophy Science, and Logic*, University of California Press.

# Capítulo 6

## O SÉCULO XIV

### Meta da aula

Apresentar críticas e transformações sofridas pelo aristotelismo que foram importantes no estabelecimento de categorias da Física.

### Objetivo da aula

Informar-se dos argumentos contra ou pró a Filosofia Natural de Aristóteles e como, deles, novas categorias vão sendo formadas.

### Introdução

No século XIV, foram introduzidos os conceitos de velocidade e aceleração médias, velocidade e aceleração instantâneas, movimento uniforme, movimento uniformemente acelerado, enfim, o estabelecimento de categorias que fazem parte do que, hoje, é chamado *Cinemática*. Como será visto abaixo, o contexto da discussão era investigar como *qualidades*, em geral, se transformam, entre elas, a “qualidade movimento”. Esse estudo foi iniciado no Colégio de Merton, em Oxford, Inglaterra; os principais autores mertonianos foram: Thomas Bradwardine, William Heytesbury, Richard Swineshead e John Dumbleton; a atividade da escola mertoniana de pensamento varre o período de cerca de 1328 até cerca de 1350.

Uma influência importante na concepção do ‘movimento’ sobre os autores mertonianos foi exercida por William de Ockham (Guilherme de Occam), um teólogo e frade franciscano; ele definiu o ‘movimento’ com conceitos bem diferentes dos aristotélicos, como se verá. A nova concepção de ‘movimento’ permitia a aplicação das idéias mertonianas.

Do outro lado do Canal da Mancha, no continente europeu, em Paris, Nicolas Oresme deu um tratamento geométrico às idéias dos mertonianos e Jean Buridan desenvolveu a idéia de *ímpeto*.

## 6.1 A descrição do movimento

### 6.1.1 William de Ockham

#### A “Navalha de Ockham”

William de Ockham enuncia um princípio epistemológico, que ficou conhecido como *Navalha de Ockham*, que significa (*apud* Franklin, p.537) “[...] é fútil usar mais entidades [para explicar alguma coisa], se for possível usar menos [...]”. Por exemplo, se for possível entender ‘movimento, sem postular “entidades” (conceituais) — tais como *lugar natural*, *corpo pesado*, *corpo leve* ou, ainda, como pensava Aristóteles, um “algo” para empurrar o corpo de modo que ele se mantenha em movimento — então é desnecessário usar tais “entidades” para definir “movimento”. E, de fato, segundo Ockham, “movimento” pode ser concebido como o mero deslocamento do corpo (no tempo), o que torna “fútil” o uso de outras “entidades” (*apud* Franklin, p.537):

[...] é claro que movimento local é para ser concebido como se segue: Afirmando que o corpo está em um lugar, depois em outro lugar, assim procedendo sem qualquer repouso ou qualquer coisa intermediária, além do próprio corpo, nós temos movimento local, verdadeiramente. Portanto, é fútil postular outras tais coisas.

COMEÇO BOX CURIOSIDADE

O nome “Navalha” faz sentido: O princípio “cortaria”, “jogaria fora” princípios filosóficos inúteis e futilidades filosóficas.

Veja o filme *Contato* e preste atenção ao momento em que a personagem de Jodie Foster cita a *Navalha de Ockham*. Você acha pertinente a citação?

FIM BOX CURIOSIDADE

COMEÇO BOX CURIOSIDADE

Leia o livro *O Nome da Rosa*, de Umberto Eco. Grande estudioso da Idade Média, Eco concebe uma história de detetive que se passa no século XIV; os contextos histórico e filosófico da época são descritos e são parte do mistério a resolver.

Curioso é o personagem do livro, o frade franciscano William de Baskerville, que, no cinema, foi personalizado por Sean Connery. O nome William (Guilherme, em Português) remete a William de Ockham; o nome Baskerville remete ao romance de Conan Doyle, *O Cão dos Baskervilles*, em que o personagem, Sherlock Holmes, resolve o mistério de um cão assassino, que matava membros da família Baskerville. Assim, o personagem do livro de Eco é uma fusão de um dos maiores estudiosos que desenvolveram a Lógica (Ockham) com uma das maiores “mentes analíticas” (o personagem Holmes).

No contexto da afirmativa medieval de que as verdades científicas são contingentes, pois o poder de Deus permite a Ele mudar as leis, Ockham respondia que Deus não é volúvel; como o frade do livro, foi acusado de heresia.

FIM BOX CURIOSIDADE

## 6.1.2 A transformação das qualidades: Os Mertonianos

As idéias de Ockham influenciaram seus contemporâneos, em Oxford. Um grupo de pensadores, pertencentes ao Colégio de Merton, inventaram o que se chama, hoje, *Cinemática*. Os principais Mertonianos foram: Thomas Bradwardine, William Heytesbury, Richard Swineshead e John Dumbleton; a atividade desses homens, em Merton, varre o período de cerca de 1328 até cerca de 1350.

O problema colocado pelos Mertonianos foi o de estudar como **qualidades** podem ser somadas ou subtraídas, chamado “problema da intensificação e remissão de qualidades”; por exemplo, Santa Clara e Madre Tereza de Calcutá, trabalhando juntas, formariam uma santidade maior?

Para tratar o problema de modo quantitativo, os Mertonianos atribuíram a uma qualidade uma *intensidade* e uma *extensão*; alguns exemplos da diferença entre os fatores *intensivos* e *extensivos*, no tratamento de qualidades, são as distinções entre intensidade do calor (temperatura) e quantidade de calor; entre peso específico e peso total. A *intensidade* é medida por *graus*; saber como uma qualidade varia consiste, agora, em saber como o *grau* de sua *intensidade* varia ao longo de uma linha arbitrária e imaginária, chamada *extensão*.

Os Mertonianos estabeleceram uma série de definições (Marshall Clagett, p.210-211):

termo mertoniano	aproximação moderna
Movimento	Movimento, às vészes a celeridade
Qualidade do movimento ou Intensidade da velocidade	A grandeza da velocidade
Quantidade do movimento ou velocidade total	Velocidade em um período de tempo, medida pela distância percorrida no tempo
Grau do movimento	Grandeza numérica da qualidade ou intensidade
Velocidade instantânea	Dada pela distância que seria percorrida, em um tempo, se o ponto movesse uniformemente com o grau de velocidade com que se move no instante considerado
Movimento uniforme	Definido pelo percurso de uma distância igual, em períodos de tempos iguais
Movimento uniformemente diforme	Feito com aceleração constante

Essas definições, bem como a separação de grandezas entre *intensivas* e *extensivas*, tornam-se claras com o tratamento dado por Nicolas Oresme (Clagett, p.347-367). A idéia de Oresme foi representar a *quantidade* da qualidade por áreas. A *extensão* da qualidade em um objeto é representada por uma linha horizontal, enquanto que os *graus da intensidade* da qualidade, em diferentes pontos do objeto, ao longo da linha da extensão, são marcados sobre perpendiculares erigidas ao longo da linha da extensão. Em particular, uma *qualidade uniforme* corresponde a um *gráfico retangular* e uma *uniformemente diforme* — isto é, que varia uniformemente — a um *gráfico triangular*; falava-se em *qualidade triangular* e *qualidade quadrangular*.

Vale notar que o desenvolvimento da Cinemática Mertoniana foi possível a partir do entendimento da *velocidade* (instantânea) como *intensidade* do movimento. Já a identificação da *extensão* com o *tempo* nem sempre foi óbvia; é sabido que Galileu Galilei, durante muitos anos, usou a *distância* e só a partir de 1604 usou o *tempo* (Dijksterhuis, p.339).

## Atividade

Coloque, com suas palavras, o que você entendeu por “Navalha de Ockham”.

### Resposta

A “Navalha de Occam” ou “Navalha de Ockham” é um princípio lógico atribuído ao lógico e frade inglês William de Ockam. O princípio afirma que a explicação para qualquer fenômeno deve assumir apenas as premissas estritamente necessárias à explicação do fenômeno e eliminar todas as que não causariam qualquer diferença aparente nas predicções derivadas da hipótese ou teoria.

## 6.2 O Teorema da Velocidade Média

### 6.2.1 Enunciado

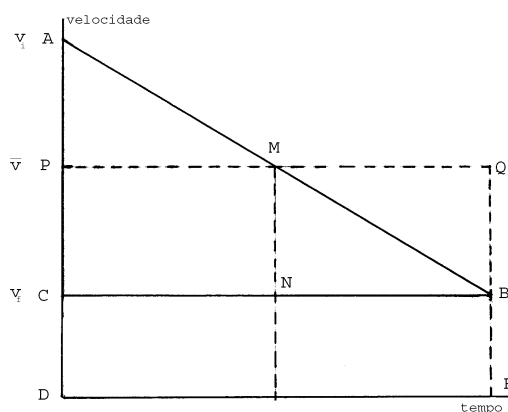


Figura 6.1: Teorema da Velocidade Média.

distância no movimento uniformemente acelerado = distância no movimento uniforme, feito com a velocidade média

COMEÇO BOX EXPLICATIVO

$$\text{velocidade média} \equiv \bar{v} = \frac{v_i + v_f}{2} \equiv v_f + \frac{v_i - v_f}{2}$$

FIM BOX EXPLICATIVO

Os mertonianos enunciaram e tentaram demonstrar um teorema, que teve vital impacto na constituição das categorias da Física, o *Teorema da Velocidade Média*. Esse teorema vai ser usado por Galileu, cerca de 200 anos depois dos Mertonianos, para solucionar o problema da queda dos corpos na superfície da Terra.

Não se conseguiu datar o teorema exatamente; provavelmente apareceu no início da década de 1330 (Clagett, p.256). A formulação mais antiga que se conhece é de Heytesbury, de 1335 (*apud* Clagett, p.262-263):

Pois, ou comece a partir do grau zero ou a partir de algum outro grau (finito), toda latitude (i.e., incremento de velocidade ou diferença de velocidade), desde que termine em um grau finito (de velocidade), e desde que seja adquirida ou perdida uniformemente, corresponderá a seu valor médio. Assim, o corpo que se move, adquirindo ou perdendo essa latitude (incremento), uniformemente, durante algum período de tempo assinalado, percorrerá uma distância exatamente igual àquela que ele percorreria em um período igual de tempo, se ele se movesse uniformemente com seu grau médio de velocidade . . . . Pois, qualquer movimento, como um todo, completado em um período inteiro de tempo, corresponde a seu grau médio — a saber, ao grau que teria no instante que marca a metade do tempo.

O teorema iguala a distância percorrida em um movimento *uniformemente diforme* (uniformemente acelerado) à distância percorrida no movimento uniforme, feito com a velocidade que o corpo tem na metade do tempo do movimento.

## 6.2.2 Demonstração

Oresme

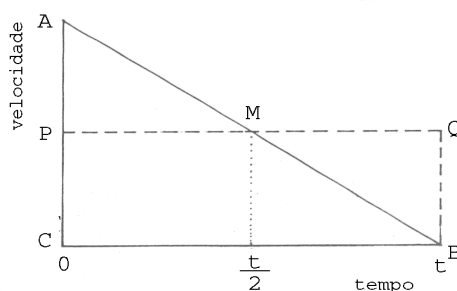


Figura 6.2:

Pela Geometria de Euclides,

$$\text{área do triângulo } AMP = \text{área do triângulo } MQB \implies \text{área do triângulo } ABC = \text{área do retângulo } PQBC$$

Para finalizar a demonstração, Oresme precisa igualar a área à distância percorrida. Ele não prova esse resultado, mas se conhecem instâncias, onde essa identificação foi textual.

## Swineshead

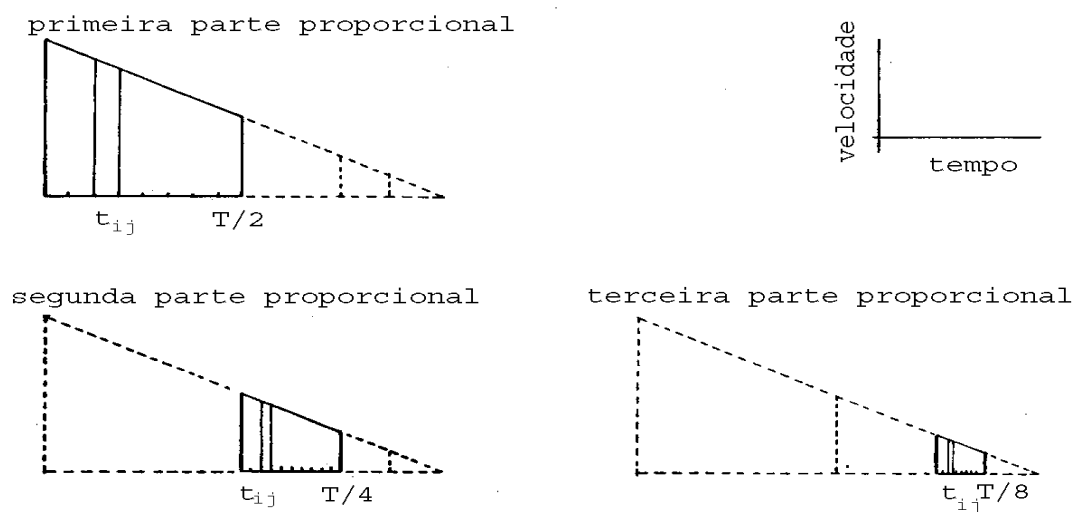


Figura 6.3:

Inicialmente, Swineshead enuncia o lema:

**Lema.** O espaço percorrido na primeira metade do movimento é quatro vezes o espaço percorrido na segunda metade, no movimento uniformemente desacelerado:

(1) Divide o tempo total,  $T$ , em  $n$  “partes proporcionais”:

$$t_1 = \frac{T}{2^1}, t_2 = \frac{T}{2^2}, t_3 = \frac{T}{2^3}, \dots, t_n = \frac{T}{2^n}, \dots;$$

então:

$$T = t_1 + t_2 + \dots + t_n + \dots = \frac{T}{2^1} + \frac{T}{2^2} + \frac{T}{2^3} + \dots + \frac{T}{2^n}.$$

(2)  $t_1, t_2$ , etc. são divididos em  $\nu$  partes iguais;  $t_{1j}$  é o  $j$ -ésimo intervalo da primeira parte proporcional,  $t_{2j}$  é o  $j$ -ésimo intervalo da segunda parte proporcional, etc:

$$\begin{aligned} t_{11} &= t_{12} = \dots = t_{1j} = \dots \\ t_{21} &= t_{22} = \dots = t_{2j} = \dots \\ &\dots \\ t_{n1} &= t_{n2} = \dots = t_{nj} = \dots \\ &\dots; \end{aligned}$$

então:

$$\begin{aligned}
t_1 = \frac{T}{2^1} &= t_{11} + t_{12} + \cdots + t_{1j} + \cdots \equiv \sum_{j=1}^{\nu} t_{1j} \\
t_2 = \frac{T}{2^2} &= t_{21} + t_{22} + \cdots + t_{2j} + \cdots \equiv \sum_{j=1}^{\nu} t_{2j} \\
&\dots \\
t_n = \frac{T}{2^k} &= t_{n1} + t_{n2} + \cdots + t_{nj} + \cdots \equiv \sum_{j=1}^{\nu} t_{2j} \\
&\dots
\end{aligned}$$

(3) Da similaridade das figuras,

$$\frac{t_{11}}{t_{21}} = \frac{t_{12}}{t_{22}} = \cdots = \frac{t_{1j}}{t_{2j}} = \cdots = \frac{t_{nj}}{t_{(n+1)j}} = \cdots = \frac{2}{1}$$

(4) Supondo existirem velocidades uniformes  $v_{11}, v_{21}, \dots, v_{nj}, \dots$  para cada intervalo  $t_{11}, t_{21}, \dots, t_{nj}, \dots$ , respectivamente, segue-se da similaridade:

$$\frac{v_{11}}{v_{21}} = \frac{v_{12}}{v_{22}} = \cdots = \frac{v_{1j}}{v_{2j}} = \cdots = \frac{v_{nj}}{v_{(n+1)j}} = \cdots = \frac{2}{1}$$

(5) Era sabido que, no movimento uniforme,

$$\frac{\text{espaço percorrido no movimento 1}}{\text{espaço percorrido no movimento 2}} = \left[ \frac{\text{velocidade no movimento 1}}{\text{velocidade no movimento 2}} \right] \times \left[ \frac{\text{tempo no movimento 1}}{\text{tempo no movimento 2}} \right].$$

Swineshead parece, agora, aplicar a expressão do movimento uniforme às partes proporcionais 1 e 2:

$$\frac{s_{1j}}{s_{2j}} = \left( \frac{v_{1j}}{v_{2j}} \right) \times \left( \frac{t_{1j}}{t_{2j}} \right) = \frac{2}{1} \times \frac{2}{1} = \frac{4}{1}.$$

Portanto, por propriedade das proporções:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{s_{11} + s_{12} + \cdots}{s_{21} + s_{22} + \cdots} = \frac{4}{1}.$$

Pela similaridade das partes proporcionais, segue-se, analogamente:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{s_2}{s_3} = \frac{s_3}{s_4} = \cdots = \frac{4}{1};$$

por propriedade das proporções:

$$\frac{s_1 + s_2 + s_3 + \cdots}{s_2 + s_3 + s_4 + \cdots} = \frac{4}{1}$$

ou

$$\frac{\text{espaço total percorrido}}{\text{espaço percorrido na 2ª metade}} = \frac{4}{1} \implies \frac{\text{espaço na 1ª metade}}{\text{espaço na 2ª metade}} = \frac{3}{1}.$$

(6) Na demonstração, Swineshead comete um erro de Lógica chamado *petição de princípio*; esse erro consiste em assumir, em um momento da demonstração, justamente o que se deseja



demonstrar; no caso, o uso do próprio teorema, no ítem (5). Portanto, o que ele demonstrou é mais bem entendido assim: Se existe um movimento uniforme correspondendo a um movimento uniformemente diforme, então as distâncias estarão na razão  $\frac{\text{espaço total}}{\text{espaço na 2ª metade}} = \frac{4}{1}$ .

**Teorema.** Para demonstrar o teorema, é suficiente mostrar que, se a velocidade uniforme eqüivalente ao movimento uniformemente acelerado não for a média das velocidades, então a relação  $\frac{3}{1}$ , obtida no lema, não é verdadeira.

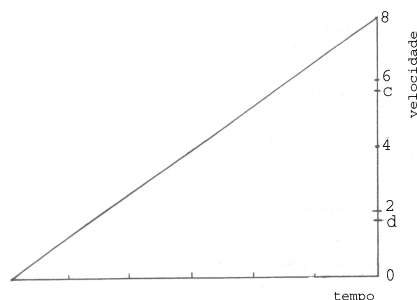


Figura 6.4:

Swineshead supõe um movimento acelerado, partindo do grau 0 até o grau 8;  $d$  é a velocidade uniforme, correspondente à aplicação do lema à primeira metade do tempo (primeira “parte proporcional”) e  $c$  é a velocidade uniforme, correspondente à aplicação do lema à segunda metade do tempo (segunda “parte proporcional”). Pelo lema,  $\frac{c}{d} = 3$ . Então, a estratégia é mostrar que, se  $d < 2$  ou se  $d > 2$ , será  $\frac{c}{d} \neq 3$ , o que é contrário ao lema; portanto,  $d = 2$ .

Seja, pois,  $d < 2$  (a prova para  $d > 2$  é análoga). Da proporcionalidade,

$$d - 0 = c - 4 \implies c - d = 4 \implies \frac{c}{d} = 1 + \frac{4}{d} > 1 + \frac{4}{2} = 3$$

### 6.3 O ímpeto

O conceito de *ímpeto* foi desenvolvida pelo francês Jean Buridan (1300-1358). Como o antigo conceito de *força impressa* o *ímpeto* responde ao problema da possibilidade de movimento no vácuo. Nas palavras de Buridan (*apud* Franklin, p.538):

Assim, nós podemos e devemos dizer que que, em uma pedra ou outro projétil há algo impresso, que é a força motiz *virtus motiva* daquele projétil. E isso é, evidentemente, melhor do que voltar à afirmação de que o ar continua a mover o projétil. Pois o ar parece resistir. Portanto, parece-me que deve ser dito que o motor ao mover um corpo movente imprime nele um certo ímpeto *impetus* ou uma certa força motriz *virtus motiva* dom corpo movente, [ímpeto esse que age] na direção em direção à qual o movedor move o corpo movente [...].

O ímpeto de Buridan tem as seguintes propriedades:

1. É permanente. Nas palavras de Buridan (*apud* Franklin, p.538):

[...] [O] ímpeto é uma coisa de natureza permanente (*res nature permanentis*), distinta do movimento local com o qual o projétil é movido. ... E é provável que aquele ímpeto seja uma qualidade naturalmente presente e predisposta a mover um corpo no qual é impresso, do mesmo modo como se diz que uma qualidade impressa no ferro por um magneto move o ferro para o magneto.

2. É proporcional à celeridade e ao corpo. Nas palavras de Buridan (*apud* Franklin, p.538):

E com a mesma quantidade [de movimento com] que o motor move o corpo movente mais rapidamente, [o motor] imprimirá [no movente] um ímpeto mais forte ...

3. É proporcional à matéria; o conceito é mais bem entendido como “mais pesado”, mais leve” e não como “massa”. Nas palavras de Buridan (*apud* Franklin, p.538):

[...] [C]om a mesma quantidade que há de matéria, [...] o corpo recebe mais daquele ímpeto e mais intensamente. Ora, em um corpo denso e pesado, outras coisas sendo iguais, há mais da matéria prima do que em um corpo rarefeito e leve. Então, um corpo denso e pesado recebe mais daquele ímpeto e mais intensamente, do mesmo modo que o ferro pode receber mais calor do que madeira ou água da mesma quantidade. ... E, assim, se madeira leve recebe e ferro pesado, de igual volume e de igual forma, são movidos com igual celeridade pelo projetor, o ferro será movido mais longe, porque há impresso nele um ímpeto mais intenso, o qual não é tão rapidamente corrompido como seria corrompido o ímpeto menor.

4. É aplicável à rotação. Nas palavras de Buridan (*apud* Franklin, p.538):

- (a) Essa é, também, a razão porque é mais difícil trazer ao repouso uma roda de moínho maior que está movendo rapidamente do que uma menor, evidentemente porque na maior, outras coisas sendo iguais, há mais ímpeto.
- (b) [...] Se você causa a rotação de uma roda de moínho muito pesada e grande e você, então, deixa de movê-la, ela vai-se mover um pouco mais pelo ímpeto que adquiriu. Não somente isso, mas você não pode trazê-la imediatamente ao repouso; porém, [é verdade que], por causa da resistência da gravidade da roda, o ímpeto será continuamente diminuído, até que a roda pare de mover. E, se a roda durasse para sempre, sem diminuição ou alteração nela, e se não houvesse resistência corrompendo o ímpeto, talvez a roda se movesse perpetuamente pelo ímpeto.

5. O ímpeto foi usado para explicar a aceleração na queda na superfície da Terra. Nas palavras de Buridan (*apud* Franklin, p.538):

[...] um corpo pesado não somente adquire movimento de seu movedor principal, i.e., gravidade, mas ele também adquire um certo ímpeto com aquele movimento. Esse ímpeto tem o poder de mover o corpo pesado, em conjunção com a gravidade natural permanente. E, porque aquele ímpeto é adquirido em comum com o movimento, então, quanto mais veloz é o movimento, maior e mais forte é o ímpeto. Assim, portanto, no começo, o corpo é movido por sua gravidade natural, somente; então, ele é movido vagarosamente. Depois, ele é movido, ao mesmo tempo, por aquela mesma gravidade e pelo ímpeto adquirido; conseqüentemente, ele é movido mais rapidamente. E, porque o movimento se torna mais rápido, o ímpeto,

também, se torna maior e mais forte e, assim, o corpo pesado é movido, simultaneamente, por sua gravidade natural e por aquele ímpeto maior e, assim, ele moverá mais rapidamente, de novo; e, assim, ele será acelerado, sempre e continuamente até o fim.

Apesar das citações sugerirem alguma quantificação do *ímpeto*,  $I \propto v$ ,  $I \propto$  tamanho do corpo, e de ser grande a tentação de reconhecer nessas citações o *momentum linear*, *momentum angular* e até *energia*, essa extrapolações não são permitidas. Para começar, só uma grandeza, o *ímpeto*, daria conta de três grandezas diferentes; depois, o contexto de categorias em que o *ímpeto* é inserido é diferente; por outro lado, Buridan está reconhecendo que certas propriedades do movimento requerem certo “algo”. E o reconhecimento desse “algo” e da possibilidade de movimento no vácuo abrem o caminho para a *Lei da Inércia*; afinal, como já visto, um dos argumentos de Aristóteles contra o vácuo está nas “propriedades inerciais” do vácuo.

#### COMEÇO BOX CURIOSIDADE

Jean Buridan foi um filósofo e religioso francês; embora tenha sido famoso e influente na alta Idade Média, não é muito conhecido na contemporaneidade. Uma de suas contribuições mais significativas foi desenvolver e popularizar a “teoria do ímpeto”. Essa teoria, de acordo com o historiador Alexandre Koyré, pavimentou o caminho para o surgimento das Físicas de Galileu e de Newton.

O paradoxo conhecido como *Asno de Buridan* não foi originado pelo próprio Buridan, pois é encontrado na obra *De Cælo*, de Aristóteles. No paradoxo, a seguinte questão é colocada: Como um asno, diante de duas refeições igualmente tentadoras, poderia racionalmente escolher entre elas? Por não escolher, acabaria morrendo de fome. Em nenhum momento Buridan discute esse problema específico, mas o paradoxo leva seu nome, porque ele defende um determinismo moral pelo qual, salvo por ignorância ou impedimento, um ser humano, diante de cursos alternativos de ação, deve sempre escolher o maior bem; Buridan defendia que uma escolha deveria ser adiada até que se tivesse mais informação sobre o resultado de cada ação possível.

#### FIM BOX CURIOSIDADE

#### Atividade

Tente dar uma leitura contemporânea ao argumento de Buridan.

#### Resposta

Instante $t$	velocidade adquirida no instante, devido à gravidade	Ímpeto adquirido no instante, devido à gravidade	Ímpeto total	velocidade
0	0	0	0	0
$\Delta t$	$v$	$mv$	$mv$	$v$
$2\Delta t$	$v$	$m$	$2mv$	$2v$
$3\Delta t$	$v$	$mv$	$3mv$	$3v$
...	...	...	...	...
$n\Delta t$	$v$	$mv$	$n(mv)$	$nv$

## Referências

- Clagett, Marshall (1959) *Science of Mechanics in the Middle Ages*, University of Wisconsin Press.
- Dias, Penha Maria Cardoso (1992) “O Teorema da Velocidade Média: Um Antecedente Medieval da Física de Galileu”, *Revista Perspicillum* **6** (1992), 9-24.
- Dijksterhuis, Eduard Jan (1959) *The Mechanization of the World Picture*, 1959. Traduzido para o Inglês por C. Diskhoorn, Oxford University Press, 1961, 1969; Princeton University Press, 1986 (citações são dessa edição).
- Franklin, Allan (1976) “Principle of Inertia in the Middle Ages”, *American Journal of Physics* **44**, 529-544.
- Grant, Edward (1977) *Physical Science in the Middle Ages*, Cambridge University Press.

# Capítulo 7

## GALILEU GALILEI: O ÚLTIMO DOS ANTIGOS OU O PRIMEIRO DOS MODERNOS?

### Meta da aula

Apresentar as contribuições de Galileu Galileu.

### Objetivo da aula

Informar-se do modo como Galileu Galilei transformou idéias medievais e do tratamento original que deu a problemas antigos.

### Introdução

É comum ouvir dizer que Galileu Galilei (1564-1642) inaugurou uma “revolução científica”; a expressão “revolução científica” é usada para indicar uma transformação radical no pensamento científico. Entretanto, não é simples caracterizar uma “revolução”; o problema exige que se caracterize a natureza da inovação, se o novo foi a transformação do velho ou se foi algo inteiramente sem precedentes; e, em História, isso depende muito da linha demarcatória entre novo-velho, algo subjetivo, que depende das preferências do historiador.

Pierre Duhem, o grande químico, historiador e filósofo, propôs que Galileu está em uma linha de continuidade com os pensadores do século XIV, principalmente os Mertonianos. Duhem leu e comentou manuscritos medievais; comparação com o *Discurso sobre Duas Novas Ciências*, de Galileu, mostra o uso do *Teorema da Velocidade Média*, no estabelecimento das leis da queda dos corpos. Mas o problema não é simples. Um outro historiador importante, Alexandre Koyré, contrariamente, propõe que Galileu foi um pensador inteiramente original. Em uma tentativa de reconciliação, Moody, após sua investigação da literatura medieval, escreveu (p.42):

[N]o século quatorze, essas idéias *não* foram transformadas em princípios fundamentais de uma nova ciência, *não* foram reunidos em uma unidade coerente e *não* foram generalizadas de modo a

causar o abandono de doutrinas incompatíveis, aceitas por Aristóteles. Foi Galileu quem fez essas coisas. [...]. Ele não criou sua mecânica do nada [...]. Porém, ele concebeu o *tipo* de ciência que se tornou a Mecânica Clássica, usando materiais acessíveis a ele e construindo sua ciência com os fundamentos no lugar certo.

Mas polêmicas em História são difíceis de decidir, até porque os critérios e categorias não têm uma “camisa de força” tão rígida, quanto os cálculos da Física. Na década de 1970, um historiador, Stillman Drake, conseguiu interpretar alguns “rabiscos” de contas feitas por Galileu em seus rascunhos; ele associou as contas a experimentos feitos por Galileu, na descoberta da lei da queda dos corpos ( $s \propto t^2$  e  $v^2 \propto s$ ); acontece que, como dito acima, a justificativa apresentada em *Dois Novas Ciências* é o teorema medieval. Isso não só revive o débito aos medievais, mas complica o assunto; após a pesquisa de Drake, não se duvida que Galileu fez experimentos, embora com as seguintes qualificações sobre o significado epistemológico dos experimentos (I. Bernard Cohen, p.196-204): Qual o papel dos experimentos nas descobertas de Galileu? Foram elas o “caminho da descoberta”, isto é, o modo como Galileu descobriu as leis? Foram meras verificações? Note que, mesmo que seja verdade que Galileu tenha usado experimentos na descoberta das leis, isso não significa que as leis sejam meras leituras de dados, pois dados podem ser organizados de muitos modos e sua organização envolve teorias, categorias do pensamento, etc. Uma pergunta historiográfica pode, também, ser feita (Cohen, p.196-204): Qual o papel dos experimentos nas descobertas de Galileu? Se os experimentos foram um ingrediente essencial no “caminho da descoberta”, por que Galileu os omitiu, na apresentação das leis, no *Dois Novas Ciências*, procurando a justificativa racional através do teorema medieval?

Finalmente, uma observação. O título desta aula é metafórico. Não existe, em História, algo como o primeiro que fez isso ou aquilo, até porque idéias nem sempre aparecem com a nitidez que a posteridade lhes outorga. Porém a metáfora, por ser proposital, foi colocada para chamar atenção de algo.

Galileu inovou e muito. A aplicação do *Teorema da Velocidade Média* à queda dos corpos foi feita por ele, duzentos anos após os mertonianos (Cohen, p.203); o uso de experimentos, ainda que seja um exagero dizer que ele inventou a Física Experimental, como se ouve, é outro elemento de sua inovação. Mas Galileu foi um clássico, em outros sentidos: Ele não aceitou as órbitas elípticas de seu contemporâneo, Johann Kepler, mas considerava que a órbita era circular (Dijksterhuis, p.349); ele enunciou a *Lei da Inércia*, mas não soube tratar o movimento circular e, como se verá, abaixo, aplicou a lei ao movimento circular.

## 7.1 A queda dos corpos na superfície da Terra

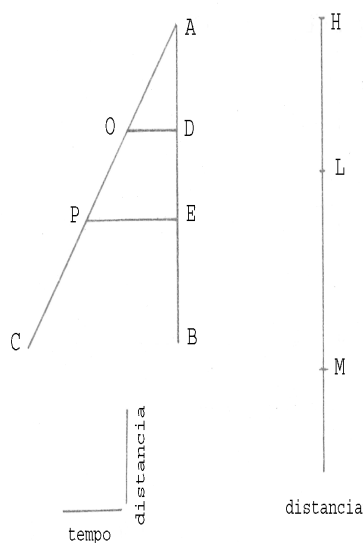


Figura 7.1:

No segundo dia do *Discurso Sobre Duas Novas Ciências*, Galileu demonstra o *Teorema da Velocidade Média*; sua demonstração é similar à de Oresme. Como dito na aula anterior, Galileu considerou que a *extensão* fosse o *tempo* a partir de 1604 (Dijksterhuis, p.339). Então, ele aplica o teorema à queda dos corpos na superfície da Terra:

Se qualquer corpo desce a partir do repouso, com um movimento uniformemente acelerado, os espaços percorridos em qualquer tempo, por aquele corpo, estão relacionados na razão dupla desses mesmos tempos, isto é, como o quadrado desses tempos.

Demonstração: Seja

$$HL = \text{distância percorrida no tempo AD}$$

$$HM = \text{distância percorrida no tempo AE}$$

Pelo Teorema da Velocidade Média:

$$HL = \text{distância percorrida com velocidade uniforme } \frac{OD}{2}$$

$$HM = \text{distância percorrida com velocidade uniforme } \frac{PE}{2}$$

$$\left[ \frac{\text{distância percorrida na 1ª etapa}}{\text{distância percorrida no 2ª etapa}} \right] = \left[ \frac{\text{velocidade na 1ª etapa}}{\text{velocidade na 2ª etapa}} \right] \times \left[ \frac{\text{duração do 1ª etapa}}{\text{duração do 2ª etapa}} \right]$$

$$\frac{HM}{HL} = \frac{\frac{PE}{2}}{\frac{OD}{2}} \times \frac{AE}{AD}$$

Mas, da similaridade,  $\frac{PE}{OD} = \frac{AE}{AD} \implies \frac{HM}{HL} = \left(\frac{AE}{AD}\right)^2$ . Analogamente,  $\frac{PE}{OD} = \frac{AE}{AD} \implies \frac{HM}{HL} = \left(\frac{PE}{OD}\right)^2$ . O primeiro resultado é escrito, hoje,  $s = \frac{1}{2}gt^2$  e o segundo,  $2gs = v^2$ .

## 7.2 O Princípio da Inércia

Galileu formulou o *Princípio da Inércia* no contexto de uma discussão sobre a origem da queda dos corpos, em seu livro *Diálogo sobre os Dois Sistemas do Mundo: O Ptolemaico e o Copernicano*. Nesse livro, as discussões acontecem entre três personagens: Um, que representa Galileu (Salviati); outro, que representa o pensamento comum arraigado (Simplício); o último, o leigo inteligente (Sagredo) que, é claro, vai ser convencido por Salviati. O diálogo é o seguinte (*Dois Sistemas*, p.144-148):

**Salviati:** [...] Agora me diga: Suponha que você tenha uma superfície plana, lisa, feita de um material como o aço. Ela não está paralela com o solo e, em cima dela, você coloca uma bola perfeitamente esférica e feita de um material pesado, como o bronze. O que você acredita que irá acontecer, quando a bola for solta? Você não acredita, como eu, que ela permanecerá parada?

**Simplício:** A superfície está inclinada?

**Salviati:** Sim, isso foi assumido.

**Simplício:** Não acredito que ela permanecerá parada; pelo contrário, tenho certeza de que ela irá espontaneamente rolar para baixo.

[...]

**Salviati:** [...]. Durante quanto tempo você acha que a bola permanecerá rolando e com qual velocidade? Lembre-se que eu disse que era uma bola perfeitamente esférica e uma superfície altamente polida, de modo a remover todos os impedimentos acidentais e externos. Da mesma forma, eu quero que você despreze, também, qualquer impedimento do ar, causado por sua resistência à separação, e todos os outros obstáculos acidentais, se existir algum.

**Simplício:** Eu o compreendi perfeitamente e lhe respondo que a bola continuaria a mover indefinidamente, tão longe quanto a inclinação da superfície se estendesse e com um movimento continuamente acelerado. Pois tal é a natureza dos corpos pesados [...]; e, quanto maior a rampa, maior seria sua velocidade.

**Salviati:** E se alguém quisesse que a bola se movesse para cima, nessa mesma superfície, você acha que a bola [poderia] ir?

**Simplício:** Não espontaneamente; não. Mas arrastada ou atirada forçadamente, ela iria.

**Salviati:** E se a bola fosse arremessada com um ímpeto forçadamente impresso nela, qual seria seu movimento e quão rápido [seria ele]?

**Simplício:** O movimento iria constantemente diminuir e seria retardado, sendo contrário à natureza, e teria uma duração maior ou menor, de acordo com um maior ou menor impulso e menor ou maior aclave.

**Salviati:** Muito bem; até aqui você me explicou o movimento sobre dois planos diferentes. Em um declive, o corpo pesado desce espontaneamente e continua acelerando e mantê-lo em repouso requer o uso de força. No aclave, uma força é necessária para arremessá-lo e até para mantê-lo parado e o movimento impresso diminui continuamente até ser inteiramente aniquilado. Você diz, também, que uma diferença nos dois casos se origina na maior ou menor inclinação do plano, de forma que, em um declive, uma velocidade maior se segue de uma maior inclinação, enquanto que, ao contrário, em um aclave, um dado corpo em movimento, arremessado com uma força dada, move-se mais longe, de acordo com uma menor inclinação.



Agora, diga-me o que aconteceria, se o mesmo corpo em movimento fosse colocado numa superfície sem aclive ou declive [plana].

**Simplício:** [...]. Não havendo declive, não haveria tendência natural ao movimento; não havendo aclive, não haveria resistência a ser movido. Assim, haveria uma indiferença quanto à propensão e à resistência ao movimento. Parece-me que a bola deveria permanecer naturalmente estável. [...].

**Salviati:** [...]. Acho que isso é o que aconteceria, se a bola fosse colocada firmemente. Mas o que aconteceria, se fosse dado à esfera um impulso, em qualquer direção?

**Simplício:** Deve ser concluído que ela se moveria naquela direção.

**Salviati:** Mas com que tipo de movimento? Um continuamente acelerado, como no declive, ou um continuamente retardado, como no aclive?

**Simplício:** Não havendo aclive ou declive, não posso ver uma causa para desaceleração ou aceleração.

**Salviati:** Exatamente. Mas, se não existe causa para a retardação da bola, deve haver ainda menos [causa] para que venha ao repouso; assim, até onde você supõe que a bola se moveria?

**Simplício:** Tão longe quanto a extensão da superfície continuasse sem se levantar ou abaixar.

**Salviati:** Então, se tal espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria, da mesma forma, ilimitado? Isto é, perpétuo?

**Simplício:** Assim parece-me [...].

Tendo feito a opinião comum concordar com a existência de um movimento (que chamamos de) inercial, Galileu pergunta a causa do comportamento de corpos em uma superfície inclinada [14, p.148]:

**Salviati:** Agora, diga-me, o que você considera ser a causa da bola se mover espontaneamente, quando em declive, e somente forçadamente, quando em aclive?

**Simplício:** Que a tendência dos corpos pesados é de se mover para o centro da Terra e de se mover para cima, a partir de sua circunferência, somente [forçadamente]; ora, a superfície em declive é a que se aproxima do centro [da Terra], enquanto que aquela em aclive se afasta para longe [do centro da Terra].

Embora, nessa passagem, Galileu associe “gravidade” com uma maior ou menor proximidade com o centro da Terra, ele foi suficientemente inteligente para notar, em uma outra passagem (*Dois Sistemas*, p.234), que “gravidade” é o nome de algo, cuja natureza ele não conhece .

Posto isso, Galileu apresenta um exemplo do que seria a superfície inercial. Existe uma ironia na situação, pois o exemplo é o de uma superfície, na qual um movimento inercial seria impossível; no entanto, erros de grandes homens são grandes erros (*Dois Sistemas*, p.147):

**Salviati:** Então para que uma superfície não esteja nem em aclive e nem em declive, todas as suas partes devem ser igualmente distantes do centro. Existe tal superfície no mundo?

**Simplício:** Muitas delas; tal seria a superfície de nosso globo terrestre, se ele fosse liso e não ondulado e montanhoso, como é. [...].

O erro de Galileu parece ter origem na limitação do sistema físico que considera (queda livre) e do aparato conceitual de que dispõe: A origem da *Gravitação*, para ele, é a maior ou menor proximidade do centro da Terra, como explicitado no diálogo; nesse contexto, sua conclusão é inevitável, pois, de fato, uma superfície que não se aproxime e nem se afaste do centro só pode ser uma esfera (no caso, a Terra).

## COMEÇO BOX EXPLICATIVO

Acontece que, para se andar sobre uma esfera, por exemplo, ao longo, de um grande círculo, a pessoa faz curvas, o que exige uma aceleração centrípeta e o movimento nessa superfície não seria inercial.

## FIM BOX EXPLICATIVO

### Atividade

Procure, em um dicionário Latim-Português significados do termo *inertia*.

#### Resposta

Ignorância, incapacidade, inércia, inação, indolência, preguiça, apatia, indiferença, repugnância, aversão, covardia, descuido, negligência.

## 7.3 O problema do movimento da Terra. O conceito de referencial

Um dos argumentos usados desde a Antigüidade contra a possibilidade de se atribuir um movimento de rotação à Terra era que uma flecha atirada verticalmente para cima nunca poderia cair, de volta, no mesmo lugar, se a Terra movesse: Enquanto a flecha está em vôo, a Terra se move de oeste para leste, de forma que a flecha cai de volta em um ponto mais a oeste da pessoa que a atirou.

Para derrubar o argumento, alguns pensadores imaginaram que, em seu movimento para leste, a Terra arrastasse o ar e tudo que nele estivesse, como pássaros e a flecha do exemplo; assim, embora a Terra se movesse, a flecha, por ser arrastada pela Terra, poderia cair no mesmo lugar.

Porém, essa resposta é difícil de ser sustentada no caso, por exemplo, em que em vez de flechas se tivesse uma bala de canhão. Assim, a descoberta do canhão permitiu um argumento mais forte contra o movimento da Terra: Se a Terra se move de oeste para leste, o alcance do tiro para oeste seria maior do que o alcance do tiro para o leste. De fato, diz o argumento, enquanto a Terra move para leste, a bala move para oeste, de modo que o alcance seria o que a Terra moveu **acrescido** do que a bala moveu; no caso do tiro para leste, seria o que a Terra moveu **diminuído** do que a bala moveu. Se a Terra está em repouso, os alcances são iguais. Como o observado é a igualdade dos alcances, conclui-se que a Terra é imóvel.

O *Princípio da Inércia* foi utilizado por Galileu para justificar a possibilidade da Terra estar em movimento. A resposta de Galileu é que o movimento comum à Terra e a tudo que nela se encontra não desaparece (pelo *Princípio da Inércia*); assim, a bala de canhão e a flecha do primeiro exemplo, durante seus vôos, continuam a compartilhar com a Terra a velocidade que compartilhavam antes de serem lançadas. O resultado é que uma pessoa sobre a Terra só pode observar o movimento que a bala tem e que a Terra não tem, isto é, o movimento da bala relativo à Terra. Um modo curioso de ler esse argumento é que Galileu colocou a *Lei da Inércia* no lugar do ar que, ao ser arrastado pela Terra, arrastaria, com ele, tudo o que nele se encontrasse, como queriam os antigos.

Galileu concebeu um belíssimo *experimento de pensamento* para explicar como o movimento comum não é percebido (*Dois Sistemas*, p.171-173):

**Sagredo:** Acabou de me ocorrer uma certa fantasia que passou por minha imaginação um dia, quando eu viajava de navio para Aleppo, onde eu ia servir como cônsul para nosso país. Talvez possa ajudar a explicar como esse movimento em comum é não-operativo e permanece como não-existente para todas as coisas que participam dele.

[...]

Se a ponta de uma pena [de escrever] tivesse sido colocada no navio, durante toda a viagem de Veneza a Alexandreta e tivesse a propriedade de deixar marcas visíveis de sua viagem, que traço — que marca — que linha teria ela deixado?

**Simplício:** Teria sido uma linha, estendendo-se de Veneza até lá; não perfeitamente reta — ou melhor, não inteiramente em um arco de círculo perfeito [pois está na superfície da Terra] — mas mais ou menos flutuando de acordo com o balanço do navio. Mas essa flutuação, em alguns lugares uma jarda ou duas para a direita ou esquerda, para cima ou para baixo, em um comprimento de muitas centenas de milhas, teria causado pequena alteração em toda a extensão da linha. Essas seriam quase não sensíveis e, sem um erro de qualquer grandeza, [a linha] poderia ser chamada de parte de um arco perfeito.

**Sagredo:** De modo que, se as flutuações das ondas fossem retiradas, o movimento do navio seria calmo e tranqüilo, o verdadeiro e preciso movimento da ponta da pena teria sido um arco de um círculo perfeito. Ora, se eu tivesse essa pena continuamente em minhas mãos e a tivesse movido somente um pouco, às vezes nessa direção ou nesta, que alteração teria eu feito na extensão principal dessa linha?

**Simplício:** Menos do que a que seria feita em uma linha de mil jardas que fosse desviada de uma reta absoluta aqui e ali por um olho de pulga.

**Sagredo:** Então, se um artista tivesse começado a desenhar com essa pena, em uma folha de papel, quando deixamos o porto e continuasse a fazê-lo durante todo o percurso, até Alexandreta, ele teria sido capaz de extrair do movimento da pena uma narrativa inteira de muitas figuras, completamente traçadas e esboçadas em milhares de direções, com paisagens, edifícios, animais e outras coisas. No entanto, o movimento real, essencial, marcado pela ponta da pena teria sido, apenas, uma linha; longa, é verdade, mas muito simples. Mas quanto às ações do artista, estas teriam sido conduzidas exatamente da mesma forma tivesse o navio permanecido parado. A razão pela qual nenhum traço permaneceria do longo caminho da pena, exceto pelas marcas desenhadas no papel, é que o movimento de Veneza a Alexandreta é comum ao papel, à pena e a tudo mais no navio. Mas os pequenos movimentos, para trás e para a frente, para a direita e para a esquerda, comunicados pelos dedos do artista à pena, mas não ao papel, e pertencendo somente àquela, poderiam, por isso, deixar um traço no papel, o qual permaneceu estacionário a esses movimentos.

A força do argumento está na própria situação que descreve: O ar como condutor da flecha não faz parte do sistema físico descrito, um navio e um artista nele; no entanto, cartas são escritas no navio, quadros desenhados e “capelas sistinas” são pintadas na nave Terra. Mas deve-se notar que Galileu não se livra inteiramente da inércia circular, visto que a situação seria mais corretamente colocada em um movimento do navio em uma superfície plana.

Um outro argumento contra o movimento da Terra era que, se ela girasse em torno de seu eixo, tudo o que se encontrasse em sua superfície seria atirado para fora, como pessoas, árvores, casas, etc (*tendência centrífuga*). Galileu tentou responder a esse argumento (*Dois Sistemas*), mas sua resposta, além de trabalhosa e cheia de argumentos sutis, está inteiramente errada.

## 7.4 Galileu e a medida da força pelo peso (1638)

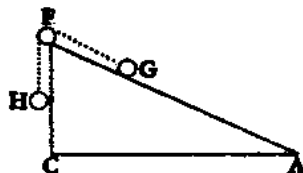


Figura 7.2: **O plano inclinado.** O peso  $H$  é ligado ao corpo  $G$  por um fio, passando por uma polia ( $F$ ). As forças estão em equilíbrio, de modo que  $H$  cancela a “força impulsionadora” de  $G$ , para baixo.

Galileu enunciou o resultado que a velocidade no pé de um plano inclinado é sempre a mesma, se a altura do plano for a mesma (a inclinação muda, é claro). Esse resultado foi contestado, principalmente porque a medida do tempo de queda não era rigorosa. Para dirimir dúvidas, Galileu pediu a seu aluno, Vincenzo Viviani, que escrevesse uma nota-de-pé-de-página com uma demonstração teórica, adicionada à segunda edição de seu *Dois Novas Ciências*.

Nessa nota, Galileu calcula a “força que impele para baixo” um corpo colocado sobre um plano inclinado. A importância de se incluir essa nota, aqui, é para enfatizar que o **peso** serve como medida de força (no caso, da componente ao longo do plano, do próprio peso), fato que vai ser explorado por Cristiaan Huygens e Isaac Newton, no século XVII. Parafraseando o raciocínio de Galileu (*Dois Novas Ciências*, p.209):

$$\text{princípio da velocidade virtual: } \frac{\text{força no corpo } m (= mg)}{\text{força no corpo } M (= Mg)} = \frac{\text{distância vertical de queda de } M}{\text{distância vertical de queda de } m} .$$

O vínculo devido ao barbante que liga as massas é:

$$\text{distância percorrida por } M \text{ no plano} = \text{distância vertical de queda de } m \equiv \delta s .$$

Então o *princípio da velocidade virtual* pode ser escrito:

$$\frac{mg}{Mg} = \frac{\delta s \sin \phi}{\delta s} \quad \text{ou} \quad mg = Mg \sin \phi .$$

Como

$$\text{peso que equilibra a “força que impele”} = mg ,$$

segue-se

$$\text{“força que impele”} \equiv Mg \sin \phi .$$

## Atividade

Galileu possuía um conceito de “força”?

### Resposta

Galileu nunca formulou o conceito de ‘força’. Para ele, “gravidade era, apenas, um nome para algo, cuja natureza era desconhecida.

## 7.5 O caso da luneta

Galileu construiu uma luneta e a voltou para os céus; ele observou (Clive Morphet, p.20):

1. A natureza supra-lunar dos cometas.
2. Novas estrelas, as *novas*. Sabe-se, hoje, que algumas estrelas, quando velhas, “explodem”, emitindo luz intensa (brilho, visto da Terra) e formando, nessa explosão, outra estrela.
3. Novos astros, invisíveis a olho nú.
4. Montanhas na Lua.
5. As luas de Júpiter.
6. Os anéis de Saturno.
7. Manchas no Sol.
8. Fases de Vênus.

### COMEÇO BOX CURIOSIDADE

Por volta de 1600, surgiram, na Holanda, os primeiros telescópios, que, logo, se espalharam pela Europa. Galileu construiu seu próprio telescópio, sem nunca ter visto um. Bastou-lhe a descrição de um instrumento que aparecera em Veneza. Um grande mérito de Galileu foi apontar o seu telescópio para o céu, o que não tinha sido feito antes, pelo menos de modo científico. Descobriu tantas coisas novas que, em poucos meses, escreveu e publicou o *Sidereus Nuncius (A Mensagem das Estrelas)*, com apenas 24 páginas, mas rico em revelações.

### FIM BOX CURIOSIDADE

Ora, o mundo supra-lunar é imutável, incorruptível e perfeito; portanto, novas estrelas, cometas que passam e vão embora, manchas que aparecem e desaparecem do Sol, tudo isso, é inconsistente. A Lua, com suas montanhas e vales, Júpiter, com suas luas, parecem-se com a Terra e, juntos com a assimetria de Saturno, quebram a natureza esférica, perfeita, do mundo supra-lunar (Morphet, p.21). As observações de 1 a 7 abalam a credibilidade do sistema filosófico, porém não colocam o Sol no centro do sistema planetário; parecem ser “propaganda”. Situação diferente é a das fases de Vênus: Além de quebrarem a estrutura filosófica, as fases só podem ser observadas se o Sol estiver no centro do sistema (Morphet, p.21). Somente os planetas interiores à Terra (Mercúrio, Vênus) e a Lua podem apresentar fase, pois o fenômeno depende do Sol estar iluminando esses astros, a partir do centro das órbitas; no sistema geocêntrico, só a Lua pode ter fase. Portanto, de todas as observações, somente a fase de Vênus tem a ver com o fato do sistema solar ser heliocêntrico.

## Atividade

Procure em um livro introdutório de Astronomia, por que, no sistema heliocêntrico, um planeta entre o Sol e a Terra apresenta fases, se visto da Terra. Esses planetas são Mercúrio e Vênus.

As observações foram contestadas. Galileu foi questionado — **corretamente** (Morphet, p.17): Como ele, Galileu, pode saber que a observação é algo no Universo e não alguma coisa do aparato (a luneta)? O questionamento é epistemologicamente pertinente. Já foi dito, no começo desta aula, que a observação depende de teorias: Como se pode saber que o aparato faz justamente o que se quer ele faça? Isso depende da teoria do aparato e outras teorias relacionadas. Obviamente, no caso da luneta, um aparelho rudimentar, seria fácil verificar que as observações independem da luneta, pertencem ao mundo; mas seria difícil, em experimentos sofisticados.

## Atividade

Leia no livro *The Birth of a New Science*, de Isaac Bernard Cohen, o Apêndice em que discute o papel de Galileu como “físico experimental”. Existe tradução desse livro para o Português *O Nascimento de uma Nova Ciência*.

## Atividade

Procure no livro *Contra o Método*, de Paul Feyerabend, o que ele diz sobre os experimentos de Galileu.

### Resposta

O uso da propaganda feito por Galileu para defender o Sistema Copernicano é o principal exemplo histórico em que Feyerabend fundamenta sua tese de que a subversão dos princípios metodológicos considerados corretos na produção da ciência é necessária para o progresso do conhecimento. Segundo Feyerabend, Galileu utilizou a propaganda, os truques psicológicos e algumas táticas persuasivas para induzir a aceitação da teoria heliocêntrica. Na leitura de Feyerabend, a habilidade de combinar sutilmente argumentos científicos com propaganda para induzir a aceitação de uma idéia revolucionária não diminuem a estatura científica de Galileu, mas, pelo contrário, demonstram sua genialidade.

## Referências

- Cohen, I. Bernard (1960) *The Birth of a New Physics*, Heinemann. Edição revisada, publicada por Norton, 1985; Pelican Books, 1987; Pinguin Books, 1992 (citações referem-se à 1992).
- Dijksterhuis, Eduard Jan (1959) *The Mechanization of the World Picture*, 1959. Traduzido para o Inglês por C. Diskhoorn, Oxford University Press, 1961, 1969; Princeton University Press, 1986 (citações são dessa edição).
- Galileu Galilei (1610) *Sidereus Nuncius*. Traduzido para o Português por Camenietzki, C.A., in: *Coleção Clássicos da Ciência*, Museu de Astronomia e Ciências Afins, 1987.
- Galileu Galilei (1632) *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*. Traduzido para o Inglês e comentado por Stillman Drake, prefácio por Albert Einstein, University of California Press, 1953, 1967.

- Galileu Galilei (1638) *Discourse Concerning the Two New Sciences*. Traduzido para o Inglês por H. Crew e Alfonso de Salvio, *The Great Books of the Western World*, vol. 28, Encyclopædia Britannica, 1952.
- Moody, Ernest (1966) “Galileo and his Precursors”, in: Golino, Carlo (ed) *Galileo Reappraised*, University of California Press.
- Morphet, Clive (1977) *Galileo and Copernican Astronomy (A Scientific World View Defined)*, Butterworths & Co. (Publishers) Ltd.

# Capítulo 8

## O PROBLEMA DA ASTRONOMIA

### Meta da aula

Apresentar os métodos da Astronomia de Cláudio Ptolomeu.

### Objetivo da aula

Descrever problemas colocados pela Astronomia. Tomar ciência do aparecimento de *excentricidades* e de sua importância nos métodos matemáticos da Astronomia.

### Introdução

Os gregos fizeram uma distinção entre *Astronomia Matemática* e *Astronomia Física*: Aquela determinava e predizia a posição dos astros; essa era parte da Filosofia Natural e cuidava de explicar o comportamento dos astros.

Os principais métodos da *Astronomia Matemática*, elaborados na Antigüidade, foram:

1. *Modelo das esferas concêntricas*, atribuído a Eudoxo de Cnido (c.408-355 aC).
2. *Modelo do círculo excêntrico*, cuja autoria é controversa. Com certeza, era limitado aos planetas exteriores, no tempo de Apolônio de Perga (265?-170 a.C.), e já havia sido generalizado a todos os planetas, no tempo de Hiparco de Nicéia (século II a.C.).
3. *Modelo dos epiciclos e deferentes*, atribuído, por alguns, a Apolônio, mas sem evidências conclusivas. Esse foi o modelo usado por Cláudio Ptolomeu (século II d.C.), no *Almagesto* (que significa “o maior de todos”). Esse modelo é equivalente ao *modelo do círculo excêntrico*.

O tratado de Ptolomeu foi discutido na Idade Média e foi, também, a Astronomia de que dispunha Nicolau Copérnico, Tycho Brahe e Johann Kepler. Esses autores, ainda que pensadores originais, tinham como base o modelo de Ptolomeu e partiram de seus métodos para modificar os próprios métodos.



## COMEÇO BOX CURIOSIDADE

Eudoxo de Cnido é considerado um dos maiores matemáticos de todos os tempos. Foi o descobridor da brilhante *Teoria das Proporções* entre grandezas de mesma espécie, descrita no Livro V de *Os Elementos*, de Euclides, resolvendo a questão das proporções envolvendo incomensuráveis. Sua fama histórica deve-se ao fato de ser considerado o criador do *método da exaustão*. Arquimedes atribuiu-lhe a dedução de diversos teoremas sobre áreas, círculos e esferas, como por exemplo, o teorema que diz que o volume de um cone é um terço do volume de um cilindro de mesma base e mesma altura. Descobriu um método para calcular a área de um círculo. Em seus estudos sobre os irracionais e sobre a exaustão, enunciou um postulado segundo o qual dadas duas grandezas  $A$  e  $B$ , de mesma espécie, sendo  $A < B$ , existe sempre um número inteiro  $n$ , tal que  $nA > B$ . Esse postulado é conhecido como postulado de Eudoxo-Arquimedes, porque o primeiro o criou e o segundo o utilizou intensamente. Com base nesse postulado, provou que, dadas duas magnitudes da mesma espécie,  $A$  e  $e$ , sendo  $e$  tão pequena quanto se quiser, se subtrairmos de  $A$  uma quantidade maior que sua metade e do resto, outra maior que sua metade e assim por diante, se chegará, finalmente, a um resto menor do que  $e$ ; com isso, pôde demonstrar que a duplicação sucessiva do número de lados de um polígono inscrito exaure o círculo, que a área de um círculo é proporcional ao quadrado de seu raio e que pirâmides de bases triangulares e mesma altura têm volumes proporcionais às áreas das bases, afirmações feitas, respectivamente, por Antifon, Hipócrates e Demócrito, mas só provadas por Eudoxo. Ele não descobriu como calcular o coeficiente de proporcionalidade entre as áreas dos círculos e os quadrados dos raios,  $\pi$ , mas seus estudos fizeram com que, mais tarde, isto fosse feito. Na História da Ciência também é conhecido como o pai da Astronomia científica, por seus cálculos em relação às grandezas cósmicas, em geral atendendo a solicitações de seu mestre Platão. Criou um modelo matemático de representação do movimento dos planetas denominado de *modelo das esferas concêntricas*.

## FIM BOX CURIOSIDADE

## 8.1 A Astronomia Matemática

O postulado fundamental da *Astronomia Física* era que os astros se movem com movimento circular uniforme, como visto na aula 4. Porém, os movimentos dos planetas, como se apresentam à observação, não são movimentos circulares uniformes, apresentando, pois, “anomalias”. O postulado fundamental da *Astronomia Matemática* determinava que as *aparências* (fenômenos) fossem *salvas* (explicadas) pela composição de movimentos circulares uniformes; daí a expressão *salvar aparências*.

## COMEÇO DE BOX DE ATENÇÃO

Hoje em dia, na Epistemologia, a expressão “salvar aparências” não é elogiosa. Ela se refere a hipóteses *ad hoc*, que “salvam” (no sentido vernacular) teorias e vaidades, mas não o conhecimento.

Chama-se hipótese *ad hoc* — do Latim *para agora* — a uma hipótese, em geral arbitrária ou “tirada do bolso”, que se introduz em uma teoria para justificar um fato ou um resultado anterior que, de outra forma, permaneceria alheio à teoria ou, até mesmo, contraditório à teoria.

## FIM DE BOX DE ATENÇÃO

As principais *aparências* eram:

1. *Segunda anomalia*. Essa “anomalia” é a *retrogradação*. Em seu trajeto anual pelo céu, atravessando as constelações do Zodíaco, os planetas, de tempo em tempo, parecem “dar marcha-a-ré”.

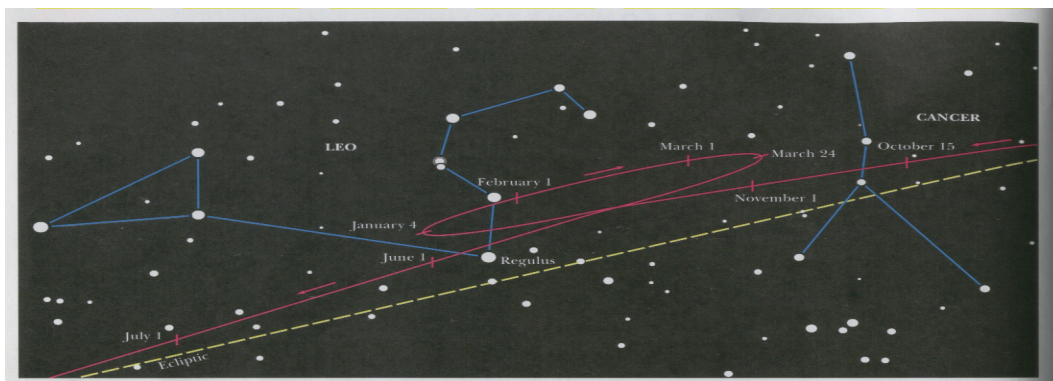


Figura 8.1: **Retrogradação dos planetas** (Kaufmann, p.56). A figura mostra uma retrogradação de Marte entre Janeiro e Março.

2. *Primeira anomalia*. Essa “anomalia” consiste no fato de que o tempo transcorrido entre duas retrogradações sucessivas varia, quando o planeta faz seu movimento anual pelo Zodíaco. Com respeito ao Sol (já que seu movimento era tratado como o dos planetas), o tempo para percorrer duas metades da *eclíptica* não é o mesmo.
3. *Variação do brilho dos planetas*. A “anomalia” era atribuída à maior ou menor proximidade com a Terra, de modo que o maior brilho ocorreria com a maior proximidade (*perigeu*). Ora, se o planeta percorre um movimento circular em torno da Terra, ele não pode se aproximar e nem se afastar dela.

Os modelos astronômicos acima mencionados tentavam “salvar as anomalias”.

## Atividade

Procure, em um livro de Astronomia introdutório ou no livro de Thomas Kuhn (referência abaixo), a explicação da retrogradação

### Resposta

Tem a ver com o movimento do planeta relativamente à Terra.

## 8.2 O sistema ptolemaico

### 8.2.1 Primeira e terceira “anomalias”

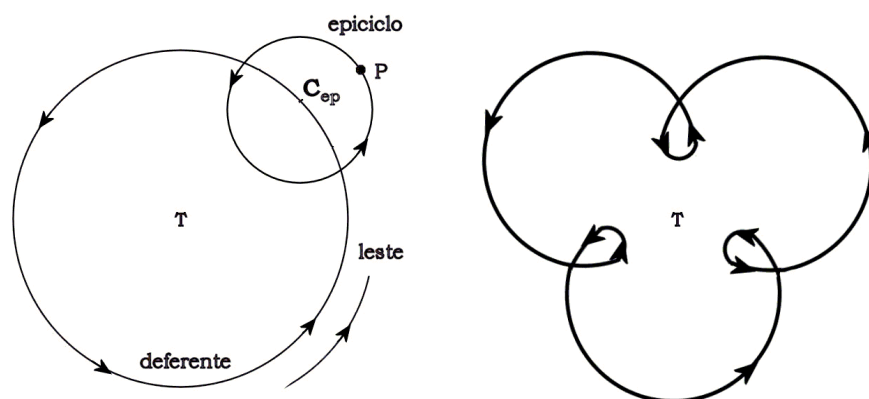


Figura 8.2: A figura à esquerda é o modelo de epiciclo e deferente simplificado. A figura da direita é o movimento resultante, visto da Terra; a figura é fechada, só se os períodos do epiciclo e do planeta forem comensuráveis.

Para “salvar” a primeira e terceira “anomalias”, foi proposto que o planeta se movesse em um círculo (*epiciclo*), cujo centro moveria ao longo de outro círculo (*deferente*), centrado na Terra; o movimento do planeta seria a composição desses dois movimentos e, visto da Terra, sua trajetória formaria “laços”, como na figura acima (direita), ora indo em um sentido, ora voltando para trás e se aproximando da Terra.

### 8.2.2 Segunda “anomalia”: Excentricidades

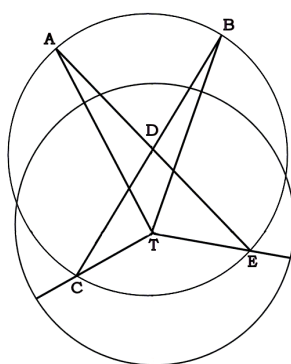


Figura 8.3: A figura mostra como a excentricidade “salva” a primeira anomalia:  $T$  é a Terra;  $D$  é o centro do deferente;  $TD$  é a excentricidade.

Para “salvar” a segunda “anomalia”, os gregos introduziram uma *excentricidade*: Se o *centro do deferente* for deslocado do centro da Terra para um ponto  $D$ , é possível considerar que o movimento do *epiciclo* seja uniforme, do ponto de vista do *centro do deferente*, mas não uniforme do ponto de vista da Terra; o planeta move-se uniformemente ao longo do *epiciclo*. De fato: Visto de  $D$ , os arcos  $AB$  e  $CE$ , sobre o *deferente*, são iguais e são subtendidos por ângulos iguais,  $\hat{\text{ângulo}} ADB = \hat{\text{ângulo}} CDE$ , logo são percorridos no mesmo tempo, pois a velocidade angular é suposta ser uniforme. Porém, vistos da Terra ( $T$ ), os arcos são subtendidos por ângulos diferentes, respectivamente  $\hat{\text{ângulo}} ATB \neq \hat{\text{ângulo}} CTE$ ; como os arcos são supostos serem percorridos no mesmo tempo, o observador em  $T$  vê arcos (ou ângulos) diferentes percorridos no mesmo tempo e a velocidade angular não pode ser uniforme.

### O ponto equante

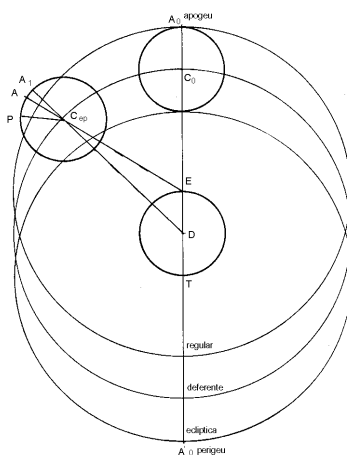


Figura 8.4: Sistema ptolomaico completo para um planeta exterior.

Para melhorar os resultados observacionais, foi necessário introduzir outra *excentricidade*, o *ponto equante*; historiadores tendem à opinião de que a introdução desse ponto tenha sido uma contribuição original de Ptolomeu.

O modelo final considera os círculos: *Eclíptica*, com centro na Terra ( $T$ ); *deferente*, com centro em  $D$ ; *círculo regular*, com centro em  $E$  (*ponto equante*); o *epiciclo*, com centro no *deferente*.

O planeta está em  $P$ , movendo-se uniformemente sobre o *epiciclo*; mas o *centro do deferente* move-se uniformemente em relação a  $E$  (*equante*) e não em relação a  $T$  (Terra) (ou: a linha *equante-centro do epiciclo* gira uniformemente em torno do *equante*).

### 8.2.3 Propriedades do Sistema Ptolomaico

Importante propriedades do sistema têm origem em sua equivalência com um modelo historicamente anterior, o do *círculo excêntrico*.

## Modelo do Círculo Excêntrico.

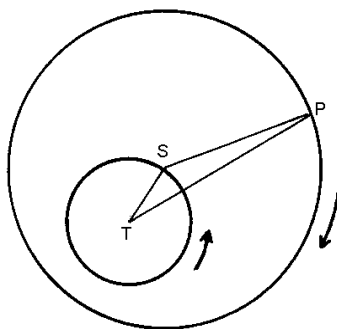


Figura 8.5:  $T$  é a Terra;  $S$  é o ponto excêntrico, centro do círculo excêntrico, onde se move o planeta  $P$ .

O planeta gira uniformemente em torno do ponto  $S$ , no sentido *contrário* ao dos signos do Zodíaco. O ponto  $S$  gira uniformemente em torno da Terra ( $T$ ), no sentido dos signos do Zodíaco.

## Eqüivalência entre os dois modelos

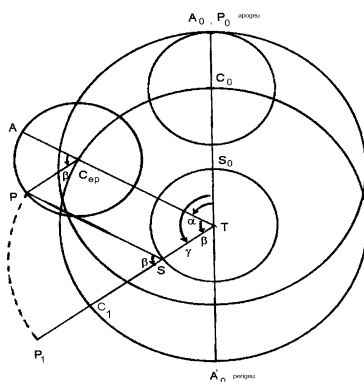


Figura 8.6: Equivalência entre os modelos.

Suponha que, no momento inicial, a configuração seja:

$$t = 0 \left\{ \begin{array}{l} \text{ponto do epiciclo mais longe da Terra é: } A_0 \\ \text{planeta em: } P_0 \equiv A_0 \equiv \text{apogeu} \\ \text{ponto excêntrico em: } S_0 \\ \text{centro do epiciclo em: } C_0 \end{array} \right\}$$

Em um tempo  $t$ , o centro do *epiciclo* gira uniformemente de um ângulo  $\alpha$  em torno de  $T$ , de modo que  $TC_0A_0 \rightarrow TC_{ep}A$ ,  $A_0\widehat{TA} \equiv \alpha$ ; no mesmo tempo, o ponto excêntrico gira uniformemente de um ângulo  $\gamma$ , em torno de  $T$ , de modo que  $S_0 \rightarrow S$ ,  $A_0\widehat{S_0TS} = \gamma$ ;  $\gamma > \alpha$ , por hipótese:

$$t > 0 \left\{ \begin{array}{ll} \text{planeta em:} & P \quad \widehat{AC_{ep}P} = \beta \\ \text{ponto do epiciclo mais longe da Terra é:} & A \quad \widehat{A_0TA} = \alpha \\ \text{ponto excêntrico em:} & S \quad \widehat{A_0TS} = \gamma \\ \text{centro do epiciclo em:} & C_{ep} \end{array} \right\}$$

Em um dos modelos, o planeta move em um círculo com centro em  $S$ , logo ele gira com  $S$ :  $S_0P_0 \rightarrow SP_1$ ; a essa rotação deve-se seguir a rotação de  $SP_1$  em torno de  $S$ , para trás, de um ângulo  $\widehat{P_1SP} = \beta$ , de modo que o planeta termine em  $P$ :  $SP_1 = SP$ . No outro modelo, o planeta está no *epiciclo*, portanto ele gira  $\widehat{AC_{ep}P}$  relativamente à linha  $TC_{ep}A$ . Para que a posição do planeta ( $P$ ) seja a mesma nos dois modelos, a rotação  $-\beta$ , em torno de  $S$ , tem de trazer  $P$  para o *epiciclo*, centrado em  $C_{ep}$ . É suficiente que  $TC_{ep}PS$  seja um paralelogramo:

$$\begin{array}{ll} C_{ep}P \parallel TS & \text{e} \quad TC_{ep} \parallel SP \\ C_{ep}P = TS & \text{e} \quad TC_{ep} = SP \end{array}$$

$$\widehat{AC_{ep}P} = \widehat{AC_{ep}TSP_1} = \widehat{PSP_1} = \beta \quad \text{e} \quad \gamma = \alpha + \widehat{AC_{ep}TSP_1} = \alpha + \beta$$

Na terminologia de Ptolomeu:

“Movimento em longitude” do planeta (movimento do centro do epiciclo no deferente):	$\alpha$
“Anomalia” (movimento do planeta no epiciclo):	$\beta$
Sol médio:	$\gamma$

## Finalmente, as propriedades

São:

1. **Raio do epiciclo:** distância Terra- $S = TS =$  raio do epiciclo. Trivialmente,  $C_{ep}P = TS$ , pois  $TC_{ep}PS$  é um paralelogramo.
2. **Posição do Sol.** O Sol é suposto estar na linha prolongada  $TS$  ( $TS \parallel C_{ep}P$ ).
3. Uma excentricidade equívale ao uso de um *epiciclo* e um *deferente*. No limite em que o raio do epiciclo é “pequeno” em relação ao raio do deferente, de modo que os “laços” não apareçam, o resultado do *epiciclo* é deslocar o centro do *deferente*, inicialmente centrado na Terra, e deformar a órbita do planeta.
4. Uma propriedade do modelo (que Ptolomeu diz ter provado) é:  $ED = DT$ ; ela é consistente com o fato que Ptolomeu desenha os círculos com o mesmo raio

$$\text{raio do epiciclo} = DT = DE$$

## 8.3 O problema de Ptolomeu

Os dados observacionais são três *oposições* do planeta. Uma *oposição* é um alinhamento na ordem: Planeta, Terra, Sol. Essas *oposições* ocorreram séculos à parte.

Então, o objetivo é traçar a figura 8-4. Isto é: Determinar a linha *apogeu-perigeu* (*linha dos apsides*) entre as constelações; determinar *DT*. Para isso tem de situar as *oposições* no *círculo regular*. O cálculo é um longo processo de aproximação, feito por cálculos repetitivos de uma mesma quantidade.

## Referências

- Boyer, Carl Benjamin (1974) *Historia da matemática*, E. Blucher.
- Copérnico, Nicolau (1543) *De Revolutionibus Orbium Cælestium*. Traduzido para o Inglês por C.G. Wallis, in: R.M. Hutchins (editor) (1952) *Great Books of the Western World*, Encyclopædia Britannica, 54 vols., vol.16, 496-838.
- Pilling, Diana Paula e Dias, Penha Maria Cardoso (2007) “A Hipótese Heliocêntrica na Antigüidade”, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 613-623.
- Dias, Penha Maria Cardoso; Santos, Wilma M.S.; Souza, Mariana T.M. (2004) “A gravitação universal (um texto para o ensino médio)”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **26**, 257-271.
- Evans, J. (1998) *The History and Practice of Ancient Astronomy*, Oxford University Press.
- Kaufmann III, W.J. (1985, 1988, 1991, 1994) *Universe*, W. H. Freeman and Company.
- T.S. Kuhn, T.S. (1957) *The Copernican Revolution*, Harvard University Press.
- Toomer, G.J. (1998) *Ptolemy's Almagest*, Princeton University Press.

# Capítulo 9

## O DEBATE ENTRE OS DOIS SISTEMAS ASTRONÔMICOS

### Meta da aula

Apresentar problemas filosóficos clássicos gerados pelo Sistema Copernicano.

### Objetivo da aula

Informar-se de problemas epistemológicos envolvendo a “Revolução Copernicana”. Em resumo, “viver” uma situação em que o problema epistemológico apresentado na aula 1 — o da escolha entre duas teorias que competem entre si — aconteceu realmente e cuja solução é motivo de discussão entre filósofos

### Introdução

Já foi observado por um historiador, G. Schiaparelli, que, dentro do *modelo do círculo excêntrico*, teria sido “natural” colocar o Sol no centro. De fato, isso parece convincente, dentro da *Astronomia Matemática*. Porém, o heliocentrismo não parece “natural”, dentro da estrutura conceitual da *Astronomia Física* (aula 4).

Em seu *The Copernican Revolution*, Thomas S. Kuhn opina que o *Sistema Copernicano* só é melhor que o *Sistema Ptolemaico* em seus aspectos qualitativos; nos aspectos quantitativos, aquele sistema precisa do complicado aparato de *epiciclos* e *deferentes*, usado no *Sistema Ptolemaico*. Portanto, continua o argumento, poucas razões existiam, se alguma, para que se escolhesse entre as duas teorias, que competiam entre si (p.168-169):

O movimento retrógrado e a variação do tempo requerido para percorrer o [círculo] eclíptico eram as duas grandes irregularidades planetárias, que, na Antigüidade, levaram os astrônomos a empregar epiciclos e deferentes ao tratar o problema dos planetas. O sistema de Copérnico explica essas mesmas grandes irregularidades e o faz sem fazer uso de epiciclos ou, pelo menos, grandes epiciclos.

[...]



[...] Copérnico pode dar uma explicação *qualitativa* dos movimentos planetários mais econômica do que Ptolomeu. Mas para obter uma explicação *quantitativa* da alteração da posição planetária, Ptolomeu foi compelido a complicar o sistema fundamental de doze círculos com epiciclos menores, excêntricos e equantes e, para obter resultados comparáveis, a partir de seu sistema básico, de sete círculos, Copérnico, também, foi forçado a usar epiciclos menores e excêntricos. Seu sistema final foi pouco menos desajeitado, se nada, do que o de Ptolomeu. Ambos sistemas empregaram mais de trinta círculos; em economia, havia pouco a diferenciar entre eles. Nem poderiam os dois sistemas ser distinguidos por suas acuracidades. Quando Copérnico acabou de acrescentar epiciclos, seu desajeitado sistema centrado no Sol dava resultados tão acurados quanto os de Ptolomeu, mas não obteve resultados mais acurados. Copérnico não resolveu o problema dos planetas.

Uma extrapolação desse ponto de vista é que a hipótese central do *Sistema Copernicano* — a *hipótese heliocêntrica* — seria mais bem entendida como produto do surgimento de um movimento neo-pitagórico, na época de Nicolau Copérnico (1473-1543). O mais forte argumento parece ser a seguinte passagem do *Das Revoluções das Esferas Celestes* (p.527-528), também citada por Kuhn:

No centro de tudo, repousa o Sol. Pois, quem colocaria essa lâmpada de um belo templo em outro ou melhor lugar do que esse, de onde ela pode iluminar tudo ao mesmo tempo? De fato, é [uma] feliz [expressão] que alguns o chamem de lanterna; outros, de mente e outros, ainda, de piloto do mundo. Trimegisto o chama de “Deus visível”; a Electra, de Sófocles, “aquilo que arde em chamas todas as coisas”. E, assim, o Sol, como se repousando em um trono régio, governa a família dos astros que o rodeiam. Além disso, a Terra não é, de modo algum, roubada pelos serviços da Lua; mas, como Aristóteles diz no *Animalibus*, a Terra tem o maior parentesco com a Lua. A Terra, além disso, é fertilizada pelo Sol e concebe crias todos os anos.

Com base na opinião de Kuhn, um autor influente, tornou-se moda atribuir a idéia de Copérnico a um “espírito da época”, no caso um emergente movimento *neo-pitagórico*. Na verdade, esse é um problema de *Epistemologia*. Trata-se do problema de determinar porque teorias são substituídas por outras: Como saber porque uma teoria (o Sistema Copernicano) é mais verdadeira que outra (O Sistema Ptolemaico)? Teorias são sobre a “verdade do mundo” ou meros construtos teóricos? Se assim, qual o critério para determinar que Copérnico é melhor que Ptolomeu? Consistência com a observação? Ora, o ponto de Kuhn é que o Sistema de Copérnico não ia muito além do de Ptolomeu nesse quesito, nem dos construtos teóricos, pois usava os mesmo *epiciclos* e *deferentes*. Por que “ganhou”? Na falta de critérios científicos, aboliu-se a ciência e se atribuiu às condições sociais, ao “espírito da época” (a *Weltanschauung*, aula 1), o conteúdo de verdade de teorias.

Ninguém duvida da importância de um contexto sócio-histórico como motivador da ciência, seja apresentando novos problemas, seja livrando das amarras de velhas idéias. O problema está em atribuir a ele, tão somente, a *episteme* de uma teoria.

## 9.1 Tycho Brahe

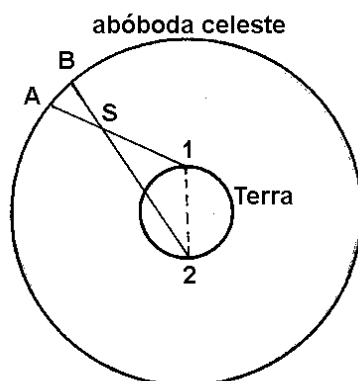


Figura 9.1: A paralaxe.

Tycho Brahe ( ) foi um astrônomo dinamarquês. Ele associou ao conhecimento dos céus, uma habilidade observacional inata e construiu instrumentos maiores e mais precisos.

Tycho não aceitou o Sistema Copernicano, por razões técnicas. O *Sistema Copernicano* prediz a *paralaxe*, um fenômeno não previsto pelo *Sistema Ptolemaico*: Uma pessoa em 1 observa uma estrela ( $S$ ) projetada contra o pano de fundo do céu, em  $A$ ; seis meses depois, como a Terra girou, a pessoa está diametralmente oposta, em 2, e vê a estrela projetada em  $B$ ; ela pensa que a estrela moveu de  $A$  para  $B$ ;  $\hat{\text{ângulo}}\text{ }ASB = \hat{\text{ângulo}}\text{ }1S2$  é chamado *ângulo de paralaxe*. Tycho não observou a *paralaxe*.

Como as estrelas estão muito longe, o ângulo de paralaxe é muito pequeno e só foi observado no final do século XIX, com potentes telescópios; a observação de Tycho era a olho nú. É claro que Tycho poderia ter levantado essa hipótese; ele o fez, mas para as estrelas serem suficientemente distantes e ainda serem vistas, elas teriam de ter um diâmetro muito grande, fora do esperado. Mas Tycho não aceitou integralmente o *sistema ptolemaico*; ele propôs seu próprio sistema, intermediário entre os dois outros: A Terra estaria no centro, com o Sol orbitando em torno dela, enquanto os outros planetas orbitariam em torno do Sol.

Tycho obteve medidas mais precisas de posições (angulares) de Marte. Marte representava um desafio; hoje, sabemos que a órbita de Marte é acentuadamente elíptica, o que não é tão acentuado, no caso dos outros planetas.

## 9.2 As Leis de Kepler

Johann Kepler trabalhou como assistente de Tycho. Ele usou os dados de Tycho para resolver o problema de determinar a órbita de Marte. O problema de Kepler não poderia diferir muito do de Ptolomeu: Calcular *excentricidades* ( $ED$  e  $TD$ ), direção do *periélio* e *afélio*, etc. Mas ele tinha melhores dados e pôde almejar uma melhor precisão dos cálculos. Ele teve de fazer hipóteses tentativas para ajustar seus dados aos cálculos e testá-las para muitas posições. Foi um trabalho árduo, que lhe consumiu, aproximadamente, 5 ou 6 anos e que resultou na publicação do *Astronomia Nova*, em 1609. Dos cálculos de Kepler resultaram as leis:

1. As órbitas planetárias são elípticas, com o Sol em um foco.

2. A linha ligando o Sol ao planeta descreve áreas iguais em intervalos de tempo iguais.

Anos depois, ele acrescenta nova lei: A razão entre o quadrado do período da órbita do planeta e o cubo do raio médio de sua órbita é uma constante.

## Referências

Copérnico, Nicolau (1543) *De Revolutionibus Orbium Cælestium*. Traduzido para o Inglês por C.G. Wallis, in: R.M. Hutchins (editor) (1952) *Great Books of the Western World*, Encyclopædia Britannica, 54 vols., vol.16, 496-838.

Pilling, Diana Paula e Dias, Penha Maria Cardoso (2007) “A Hipótese Heliocêntrica na Antigüidade”, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 613-623.

Heath, T.L. (1913) *Aristarchus of Samos (The Ancient Copernicus)*, Clarendon Press; Dover, 1981 (citações referem-se a essa edição).

T.S. Kuhn, T.S. (1957) *The Copernican Revolution*, Harvard University Press.

Toomer, G.J. (1998) *Ptolemy's Almagest*, Princeton University Press.

# Capítulo 10

## O PROGRAMA MECANICISTA

### Meta da aula

Apresentar os cânones do Mecanicismo.

### Objetivo da aula

Comparar a filosofia mecanicista *vis a vis* a filosofia das qualidades.

### Introdução

O Mecanicismo é uma doutrina filosófica que reduz a Natureza a um sistema mecânico; isto é, a Natureza é explicável pelo movimento dos corpos no espaço e pela forma dos corpos. Assim, o Mecanicismo pode ser considerado como:

1. Uma percepção filosófica do mundo.
2. Um método de explicação.

Enquanto percepção filosófica do mundo, o Mecanicismo existe desde a Antigüidade, quando tomou a forma de Atomismo; como já dito (aula 3), o Atomismo concebia a Natureza como um sistema de corpos (*plena*) em movimento. No século XVII, René Descartes fundamenta filosoficamente o Mecanicismo e apresenta explicações mecanicistas de vários fenômenos, em duas obras *O Mundo* (publicado em 1664, mas escrito cerca de vinte anos antes) e *Princípios da Filosofia* (publicado em 1644, mas escrito após *O Mundo*).

Descartes ressaltou o papel e a força da razão, colocando a *clareza e distinção* — dois novos conceitos, explicados abaixo — como critérios únicos para se chegar à verdade e mostrou interesse pelas novas ciências da Psicologia e da Física; com isso, Descartes coloca-se como um dos primeiros filósofos a valorizar o desenvolvimento dos princípios metodológicos que caracterizam o pensamento científico-filosófico do mundo moderno e contemporâneo. O pensamento cartesiano influenciou profundamente no humanismo científico, pois foi um dos responsáveis pela inauguração de uma nova idéia e uma nova concepção do ser humano e da Natureza, eminentemente distintas daquelas que prevaleceram durante a Idade Média.

O conceito de ‘movimento’ é entendido pelo conceito de *movimento local*, a simples mudança espacial; a formação dos corpos visível dá-se por aglutinação de partes menores da matéria; mas essas partes são infinitamente divisíveis, pois Descartes não aceitou o conceito de átomo e nem o de vácuo, como será visto. Para Descartes, falar de um movimento local em um Universo é estabelecer os princípios e leis para o movimento da matéria; essas leis são fundamentadas em um conceito metafísico, que estabelece Deus como organizador e criador das leis da Natureza: Deus criou o mundo com matéria em movimento e Ele criou as leis que organizam o Universo. Essas leis explicam tanto o Universo físico, quanto o corpo humano.

## Atividade

Pesquise, em um dicionário de Filosofia, os significados do termo *dynamis*, em Grego e do termo *Mechanica Rationalis*, em Latim, observando as diferenças.

### Resposta

*Dynamis*, em Grego antigo, *dinâmica*, em Português, significava *potência*; em linhas gerais, uma faculdade de poder. Particularmente, para Platão, era o “mais possível” ou tudo o que era possível, por todos os meios possíveis. A *dynamis* estava ligada a “força”: Tratava-se, tanto da força física, quanto da força moral e era usada, também, para referenciar a “força” do discurso e da inteligência. Para Aristóteles, a *dynamis* era a *potência* do discurso retórico, lógico ou científico.

*Mechanica Rationalis*, em Latim, *Mecânica Racional*, em Português, é o ramo da Física que estuda o movimento dos corpos materiais e as causas desses movimentos.

## 10.1 O método da Filosofia Natural de Descartes

Os principais pontos da Filosofia cartesiana são:

1. Descartes criticou a tradição cultural que, a seu ver, levou a muitas dúvidas, pouco saber e opiniões divergentes na Filosofia, porém a verdade deve ser unívoca. É preciso que haja um método (de pensamento ou reflexão filosófica) que possa levar a verdades incontestáveis. Como o homem orienta sua vida por opiniões, cujas validades ele não costuma questionar, o método começa, pois, advogando um questionamento sistemático.

Tudo que provenha do conhecimento sensível deve ser colocado em dúvida, porque os sentidos enganam; da mesma forma, na Matemática é preciso haver certeza de que a representação mental de algo corresponde à verdade. Em suma, só é possível ter certeza de que se duvida; é um pressuposto do método que a reflexão só pode levar à certeza (evidência absoluta), se partir da negação absoluta de todas as certezas. Mas como pode gerar certeza, a dúvida é provisória; quanto mais forte e radical for a dúvida, maior será a certeza gerada por ela e, assim, é preciso levar a dúvida às suas últimas conseqüências, se se deseja fundamentar a verdade da ciência. Porém, a dúvida é um exercício do pensamento e, portanto, aquele que duvida não pode duvidar do próprio pensamento; se a dúvida existe, existe o pensamento: “Eu que duvido penso, portanto existo”, pelo menos como ser pensante; daí, o célebre “penso, logo existo” ou, em Latim, *cogito, ergo sum*, o chamado *cogito cartesiano*, a primeira certeza, fundamento da racionalidade cartesiana e do racionalismo moderno.

2. Ao fundamentar a certeza na razão, Descartes postula que só se deve aceitar como verdade ou como uma certeza aquilo que se apresenta ao espírito de forma *clara e distinta*, ou seja, sem dúvidas.

3. Confiante na razão, Descartes pode partir para descobrir outras certezas e partiu para a prova da existência de Deus.

Porque Deus existe, é que existe a idéia de Deus, na mente humana: Como poderia um espírito finito gerar a idéia de infinito? Como poderia um ser imperfeito gerar a idéia de perfeição? A causa dessas idéias só pode ser o próprio Deus, que deixou, no ser criado, a marca de Sua infinitude, a idéia de infinito; também, se existe a idéia de um ser perfeito, é porque Deus existe.

Mas se Deus é perfeito, Ele é bom e não engana; Ele não pode permitir que o espírito humano erre sempre e nem pode permitir a interferência de um gênio maligno. Assim, surgem:

1. O otimismo científico — a crença na possibilidade da ciência (aula 1).
2. A crença inabalável na razão, como ferramenta de aquisição de conhecimento.

4. Uma conseqüência de fundamentar a certeza na razão é a separação entre o mundo físico (*res extensa*) e o pensamento (*res cogitans*). Ora, se a percepção que se tem do mundo físico decorre dos sentidos, o que garante sua realidade? De novo, dado que Deus tudo pode, é possível existir o mundo criado por Ele. Se uma idéia *clara e distinta* existe no espírito humano, é porque existe na realidade; caso contrário, o espírito do homem teria, por obra de um gênio maligno, tendência ao erro, o que, certamente, é incompatível com a idéia do bom Deus. Logo, porque Deus é bom, as representações do mundo dadas pelos sentidos não são meras ficções: Se Deus existe, o mundo físico também existe e a garantia da sua objetividade é Deus. A evidência ou certeza das idéias *claras e distintas* é o “critério de verdade” do conhecimento, sua certeza.

5. Há, no pensamento, uma idéia *clara e distinta* sobre o mundo físico: É a *extensão*. Para Descartes, a *extensão* é a essência das coisas materiais, as quais apresentam *magnitude* e *forma*. Basicamente, para que “a coisa” exista, ela tem de ter tamanho e forma. O que existe é a *substância extensa* e, conseqüentemente, o vácuo não pode existir, não é *claro e distinto*.

### 10.1.1 A Filosofia Natural

#### 10.1.2 As três leis do movimento

A primeira justificativa do ‘movimento’ é Deus, que criou o mundo com matéria (substância extensa) em movimento. A *quantidade de movimento* colocada por Deus no mundo não pode ser alterada, pois não se altera a criação divina; o próprio Deus não é volúvel e sempre age da mesma forma. As leis do ‘movimento’ derivam, pois, de Deus e garantem a imutabilidade de suas ações (*Principes*, Parte II, Artigo 37, p.84-86):

**Lei I.** Toda e cada coisa, simples e não dividida, sempre permanece, até quando puder, no mesmo estado [de movimento], a não ser que causas externas nela ajam . . . e assim sendo, concluímos que quase tudo que se move sempre o faz enquanto der.

**Lei II.** Toda e cada parte da matéria, vista em si mesma, nunca tende a continuar se movimentando em curva, mas somente em linha reta.

**Lei III.** Quando um corpo em movimento colide com outro, se possui menor força para prosseguir em linha reta, ele, então, se desvia em outra direção e conserva seu movimento, mudando, somente, sua determinação [direção]. Mas se ele tem mais força, então ele move o outro corpo com ele e dá a esse outro corpo tanto movimento quanto ele perdeu no choque.

A primeira e segunda leis, juntas, constituem o que, hoje, se chama de *Lei da Inércia* e serão discutidas na próxima aula. A terceira lei regula colisões; corpos mudam seus estados de movimento por colisões; em cada colisão, a *quantidade de movimento* do corpo individual pode mudar, mas não no todo.

Uma aplicação dessas leis foi feita por Descartes, para estudar a colisão de dois corpos. Ele usa a conservação da *quantidade de movimento*, mas considera que a *quantidade de movimento* de um corpo que se move para a esquerda é igual à do mesmo corpo, quando se move com a mesma celeridade para a direita, isto é, não considera o que, hoje, chamaríamos de natureza vetorial da velocidade. Descartes enuncia sete regras para a colisão, todas erradas, exceto uma, as quais serão criticadas por Christiaan Huygens. As regras são:

**Regra 1.**  $m_B = m_C \equiv m$ . Antes da colisão:  $v_B = v_C \equiv v$ . Depois da colisão:  $v'_B = v'_C = v$ , com  $B$  e  $C$  movendo-se em direções opostas às originais.

**Regra 2.**  $m_B > m_C$ . Antes da colisão:  $v_B = v_C \equiv v$ . Depois da colisão:  $v'_B = v'_C = v$ , com  $B$  e  $C$  movendo-se na direção original de  $B$  ( $B$  empurra  $C$ ).

**Regra 3.**  $m_B = m_C \equiv m$ . Antes da colisão:  $v_B > v_C$ . Depois da colisão:  $v'_B = v'_C = \frac{v_B + v_C}{2}$ , com  $B$  e  $C$  movendo-se na direção original de  $B$  ( $B$  empurra  $C$ ). A idéia é que  $B$  perde  $\frac{v_B - v_C}{2}$ , enquanto  $C$  ganha igual quantidade.

**Regra 4.**  $m_B < m_C$ . Antes da colisão:  $v_C = 0, v_B \neq 0$ . Depois da colisão:  $v'_C = v_C = 0$  e  $B$  é refletido, com  $v'_B = v_B$ .

**Regra 5.**  $m_B > m_C$ . Antes da colisão:  $v_C = 0, v_B \neq 0$ . Depois da colisão:  $v'_B = v'_C = \frac{m_B v_B}{m_B + m_C}$ , com  $B$  e  $C$  movendo-se na direção original de  $B$  ( $B$  empurra  $C$ ).

**Regra 6.**  $m_B = m_C \equiv m$ . Antes da colisão:  $v_C = 0, v_B \neq 0$ . Depois da colisão:  $B$  é refletido com  $v'_B = \frac{3}{4}v_B$  e  $C$  move-se na direção original de  $B$  com  $v'_C = \frac{1}{4}v_B$ . O raciocínio de Descartes é: Se  $B$  empurrasse  $C$ , ele o faria como na Regra 3, logo  $B$  perderia  $\Delta \equiv \frac{v_B - v_C}{2} = \frac{v_B}{2}$  e  $C$  ganharia igual quantidade; se  $B$  refletisse, ele o faria como na Regra 1; mas como não há razão para que aconteça um ou outro caso,  $B$  usa metade de  $\Delta$  para refletir e a outra metade para empurrar  $C$ .

**Regra 7.**  $B$  e  $C$  movem-se no mesmo sentido, com  $C$  movendo-se à frente de  $B$  e  $v_B > v_C$ . Descartes distingue três casos:

Caso 1:  $m_B > m_C$  ou  $m_B < m_C$  (porém, nesse caso, antes da colisão:  $\frac{v_B}{v_C} > \frac{m_C}{m_B}$ ). Depois da colisão:  $B$  empurra  $C$  e ambos se movem com  $v' = \frac{m_B}{m_B + m_C}v_B + \frac{m_C}{m_B + m_C}v_C$ .

Caso 2:  $m_B < m_C$ , mas antes da colisão:  $\frac{v_B}{v_C} < \frac{m_C}{m_B}$ . Depois da colisão:  $B$  reflete sem comunicar movimento a  $C$  (logo  $v'_B = v_B$ ) e  $C$  continua na mesma direção, com a celeridade original ( $v'_C = v_C$ ).

Caso 3:  $m_B < m_C$ , mas antes da colisão:  $\frac{v_B}{v_C} = \frac{m_C}{m_B}$ . Depois da colisão:  $B$  reflete com uma celeridade menor, tendo transferido parte da celeridade para  $C$  ( $v'_B < v_B$ );  $C$  continua em seu movimento com uma celeridade maior ( $v'_C > v_C$ ).

## Atividade

Tente derivar os resultados de Descartes, usando conservação da *quantidade de movimento*, mas sem levar em conta seu caráter vetorial, isto é, a *quantidade de movimento* é a mesma, mova o corpo para a direita ou para a esquerda, na mesma reta.

### Resposta

Regra 1:  $2mv = 2mv$

Regra 2:  $(m_B + m_C)v = (m_B + m_C)v' \Rightarrow v' = v$

Regra 3:  $m(v_B + v_C) = 2mv' \Rightarrow v' = \frac{v_B + v_C}{2}$

Regra 4:  $m_B v_B = m_B v_B$

Regra 5:  $m_B v_B = (m_B + m_C) v' \Rightarrow v' = \frac{m_B v_B}{m_B + m_C}$

Regra 6: Não dá para aplicar o método, pois só há uma equação (a da conservação da quantidade de movimento) e duas incógnitas,  $v'_B$  e  $v'_C$ .

Regra 7: No caso 1,  $m_B v_B + m_C v_C = (m_B + m_C) v'$ ; a imposição  $\frac{v_B}{v_C} > \frac{m_C}{m_B}$  significa que  $B$  tem mais *quantidade de movimento* do que  $C$ , embora seja menor e, nesse caso, Descartes parece fazer uma analogia com a Regra 5. No caso 2,  $\frac{v_B}{v_C} < \frac{m_C}{m_B}$  significa que a *quantidade de movimento* de  $C$  é maior do que a de  $B$ ; então, Descartes parece fazer uma analogia com a Regra 4. No caso 3,  $\frac{v_B}{v_C} = \frac{m_C}{m_B}$  significa que a *quantidade de movimento* de  $C$  é igual à de  $B$ ; então, Descartes parece fazer uma analogia com a Regra 6.

## Atividade

Qual a única regra correta? Aplique seus conhecimentos de Física sobre colisão de corpos, isto é, aplique as duas leis de conservação; se não se lembra, consulte seu livro de Física 1.

**Resposta**

Regra 1.

## Atividade

Escreva o que você entende do texto abaixo, que é o primeiro parágrafo do *Discurso do Método*, de Descartes.

Inexiste, no mundo, coisa mais bem distribuída que o bom senso, visto que cada indivíduo acredita ser tão bem provido dele que mesmo os mais difíceis de satisfazer, em qualquer outro aspecto, não costumam desejar possuí-lo mais do que já possuem. E é improvável que todos se enganem a esse respeito; mas isso é, antes, uma prova de que o poder de julgar de forma correta e discernir entre o verdadeiro e o falso, que é, justamente, o que é denominado bom senso ou razão, é igual em todos os homens; e, assim sendo, de que a diversidade de nossas opiniões não se origina do fato de serem alguns mais racionais que outros, mas, apenas, de dirigirmos nossos pensamentos por caminhos diferentes e não considerarmos as mesmas coisas. Pois é insuficiente ter o espírito bom, o mais importante é aplicá-lo bem. As maiores almas são capazes dos maiores vícios, como também das maiores virtudes, e os que só andam muito devagar podem avançar bem mais, se continuarem sempre pelo caminho reto, do que aqueles que correm e dele se afastam.

**Resposta**

*O bom senso não leva à verdade!* Assim, não se deve aplicar o bom senso à Física. Devemo-nos sempre nos ater às teorias comprovadas e às evidências. Afinal, o que é “bom senso”?

## Referências

Descartes, René (1637) *Discurso do Método*. Tradução para o Português, Livraria Sá da Costa, 1957.

Descartes, René (1641) *Meditações Metafísicas*. Tradução para o Português, Martins Fontes, 2000.

Descartes, René (1644) *Principes de la Philosophie*, in: C. Adam e P. Tannery (1897-1913) (editores) *Œuvres de Descartes*, 12 vols., J. Vrin/CNRS, edição revista, 1964-1976, v.IX-2, 1971. Publicado em Francês, em 1647.



- Descartes, René (1664) *Le Monde*, in: C. Adam e P. Tannery (1897-1913) (editores) *Œuvres de Descartes*, 12 vols., J. Vrin/CNRS, edição revista, 1964-1976, v.IX, 1986.
- Gaukroger, Stephen (1999) *Descartes: Uma Biografia Intelectual*, EdUERJ e Contraponto.
- Koyré, Alexander (1961) “O Pensamento Moderno”. Tradução para o Português, in: *Estudos de História do Pensamento Científico*, Forense Universitária, 1991, p.15-21.
- Koyré, Alexander (1961) “As Origens da Ciência Moderna (Uma Nova Interpretação)”. Tradução para o Português, in: *Estudos de História do Pensamento Científico*, Forense Universitária, 1991, p.56-79.
- Koyré, Alexander (1961) “Galileu e a Revolução Científica do Século XVII”. Tradução para o Português, in: *Estudos de História do Pensamento Científico*, Forense Universitária, 1991, p.181-195.
- Koyré, Alexander (1961) “O De moto gravitum de Galileu — da experiência imaginária e de seu abuso”. Tradução para o Português, in: *Estudos de História do Pensamento Científico*, Forense Universitária, 1991, p.208-255.
- Koyré, Alexander (1961) “Aristotelismo e Platonismo na Filosofia da Idade Média”, in: *Estudos de História do Pensamento Científico*, Forense Universitária, 1991, p.22-45.
- Koyré, Alexander (1961) “As Etapas da Cosmologia Científica”. Tradução para o Português, in: *Estudos de História do Pensamento Científico*, Forense Universitária, 1991, p.80-90.
- Koyré, Alexander (1961) “Galileu e Platão”. Tradução para o Português, in: *Estudos de História do Pensamento Científico*, Forense Universitária, 1991, p.152-180.
- Koyré, Alexander (1985) *Études Newtoniennes*, Gallimard.
- Koyré, Alexander (2002) “O Significado da Síntese Newtoniana”, in: I. B. Cohen, S. R. Westfall (org.), *Newton: Textos, Antecedentes e Comentários*, EdUERJ e Contraponto, p.84-100.
- Russell, Bertrand (2001) *História do Pensamento Ocidental*, Ediouro, 2001. Tradução de *Wisdom of the West*.
- Sapunarú, Raquel Anna (2006) *O “Estilo Newtoniano”, o Espaço, o Tempo e o Movimento “Absolutos”: Controvérsias entre Cartesianos e Newtonianos*, Dissertação de Mestrado em Filosofia, Departamento de Filosofia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

# Capítulo 11

## O PROBLEMA DO MOVIMENTO CIRCULAR

### Meta da aula

Apresentar o conceito de *força centrífuga*.

### Objetivo da aula

Interpretar fisicamente o conceito de *força centrípeta*.

### Introdução

Para o leitor moderno, a *Lei da Inércia* significa que, se um corpo não se move uniformemente em linha reta, então uma força deve atuar sobre ele. Mas essa leitura não foi óbvia. Embora Galileu tivesse enunciado a *Lei da Inércia*, ele a aplicou ao movimento circular da Terra. Como será visto a seguir, Descartes entendeu que a *Lei da Inércia* não implicava a aplicação de uma força, no movimento circular, mas implicava a supressão de uma “tendência” existente (George Smith). Essa interpretação dominou o século e influenciou Christiaan Huygens — que cunhou a expressão *força centrífuga* — e o próprio Isaac Newton, antes de seu *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*.

Newton e Huygens, independentemente, matematizaram a “tendência” descrita por Descartes. A solução de Newton (c.1664-1665) foi anterior à de Huygens, porém Huygens publicou seus resultados antes de Newton, em 1673, no *O Relógio Oscilatório (Horologium Oscillatorium)*; a demonstração dos resultados de Huygens, contudo, só foi publicada postumamente, em 1703, no *Sobre a Força Centrífuga (De Vi Centrifuga)*. O modo como Huygens concebeu o problema é conceitualmente mais rico do que o de Newton.

## 11.1 René Descartes: A “tendência” centrífuga

### 11.1.1 A metafísica da Lei da Inércia

A justificação da *Lei da Inércia*, apresentada por Descartes em *Princípios da Filosofia*, é metafísica: Deus, ao criar o universo, colocou nele matéria com movimento e repouso. Mas Deus não é inconstante, sendo isso um traço de Sua perfeição; portanto, Sua criação não pode ser alterada e o movimento obedece a leis que vêm de Deus. Outra consequência é que a *quantidade de movimento* colocada no mundo, por Ele, também se conserva.

Ora, esse argumento não justifica a superioridade da linha reta. Afinal, Deus pode fazer movimentos circulares “eternos”, como os dos corpos celestes. Além disso, como o próprio Descartes reconheceu, “os movimentos se fazem, mais freqüentemente, em linha curva”; para justificar o movimento uniforme em linha reta, Descartes entendeu que precisava introduzir outras condições. O que ele faz, então, é qualificar o modo Divino de ação. Deus age de modo a conservar o mundo do modo exato como ele se encontrava no instante da criação e não como ele se encontra em outro qualquer instante. Daí resulta uma bela derivação da simetria do mundo — a propriedade da Criatura — a partir do modo de agir do Criador. Descartes compara propriedades do movimento circular com propriedades do movimento retilíneo. A direção da tangente ao círculo muda de ponto a ponto e para determinar o círculo é preciso dar três de seus pontos; portanto um círculo não pode ser dado de uma só vez, seja, no instante da Criação. Quanto à reta, a tangente é unívoca e é possível determinar a reta, dada a tangente em um de seus pontos; logo a reta pode ser inteiramente dada no instante da Criação. Em outras palavras, a reta tem as simetrias que espelham a perfeição do Criador. Essa simetria é a indistingüibilidade de seus pontos por translações uniformes sobre a reta. Quanto às simetrias do círculo, elas não podem espelhar a perfeição divina.

### 11.1.2 A física do círculo

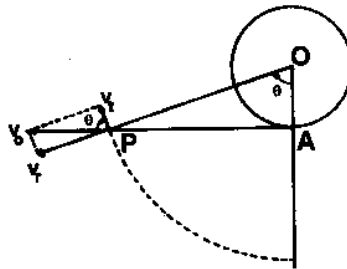


Figura 11.1: **O Movimento Circular (Descartes)**. Em qualquer ponto da reta, por exemplo,  $P$ :  $\vec{v}_0 = \vec{v}_r + \vec{v}_\theta$ , onde  $\vec{v}_r$  é a componente radial;  $\vec{v}_\theta$  é a componente tangencial;  $v_0$  é a velocidade uniforme ao longo da reta.

Após apresentar seu argumento de simetria na Parte II do *Princípios*, Descartes diz que

existe evidência empírica para o argumento (*Principes*, p.86): “[...] nós somos assegurados disso pela experiência”. A experiência é a de uma pedra que gira em uma funda.

Quando a pedra deixa a funda, ela o faz pela tangente ao círculo e não por outra curva (figura acima). Mas o argumento de Descartes vai mais além. Não é preciso que a pedra deixe a funda para se ver que o faz pela linha reta tangente ao círculo no ponto de abandono. Isso é mostrado pelo puxão sentido pela mão, enquanto gira a funda.

[...] quando se gira uma pedra em uma funda, [...] durante todo o tempo que ela está [na funda, girando] ela pressiona o meio da funda e tensiona a corda: evidentemente mostrando, com isso, que ela tem a inclinação de ir em linha reta e que ela vai em [linha] curva senão forçadamente.

“Ela vai em [linha] curva senão forçadamente”! Bela expressão, mas não significa a presença de uma “força”. Descartes decompõe a velocidade uniforme com a qual uma pedra se move ao longo de uma linha reta, ao deixar uma funda, em duas componentes: Em linguagem moderna, a componente ao longo do raio vetor ( $v_r$ ) e a componente perpendicular ( $v_\theta$ ) a ele (Descartes o faz com palavras, não matematicamente). Movimento circular ocorre, quando a componente radial é “impedida” (pela funda, por exemplo); portanto, Descartes chama a componente radial da velocidade de componente (*Principes*, p.131) “cujo efeito é impedido pela funda” e a componente tangencial, de componente “cujo efeito não é, assim, impedido”. Para que um movimento circular ocorra, não é necessário afirmar a existência de uma nova entidade — a *força*, em nosso sentido — mas é suficiente impedir um movimento ou “tendência” que está naturalmente presente; nas palavras de Descartes (*Le Monde*, p.46), “são as diversas disposições da matéria que [...] tornam [os movimentos] irregulares e curvos”.

Posto isso, Descartes imagina uma régua infinita, colocada em um plano horizontal, girando em torno de um eixo perpendicular ao plano da régua e passando por uma de suas extremidades. Uma formiguinha caminha sobre a régua, enquanto esta gira. Ora, é possível combinar os movimentos — o da formiguinha ao longo da régua e o de rotação, que a formiguinha partilha com a régua — de tal modo que a formiguinha esteja sempre sobre uma reta; Descartes reconhece que é suficiente que as componentes sejam “de tal forma proporcionais”; mas ele não produz valores numéricos para essa “proporção”. Em vez de um formiguinha fazendo “esforço”, Descartes mostra que essa “proporção” resulta da “tendência” de afastamento; ele, então, imagina um outro exemplo. Descartes considera um cilindro infinito, dentro do qual uma esfera pode deslizar sem atrito. O cilindro pode ser imaginado como a linha  $OA$  ou  $OP$  e a esfera é o ponto  $P$ , na figura acima. À medida que o cilindro gira em torno de um eixo passando por uma de suas extremidades, a esfera desliza dentro dele, permanecendo sempre sobre a linha reta.

## 11.2 Christiaan Huygens: A “força centrífuga”

### COMEÇO BOX CURIOSIDADE

O problema do relógio era importante no século XVII. Era necessário, para as navegações, achar a posição de um navio na superfície da Terra. Obviamente, isso é feito medindo a latitude (o paralelo da Terra, onde o navio se encontra) e a longitude (o meridiano da Terra, onde o navio se encontra); essa é medida pela posição dos astros, mas aquela exige um relógio. Foi instituído um prêmio para quem construísse um relógio capaz de funcionar, mesmo em um navio balançando nas ondas. O problema foi resolvido por um relojoeiro, Richard Mille.

Christiaan Huygens (1629-1695) dedicou-se ao problema de construir um relógio de pêndulo; para isso precisava medir a aceleração da gravidade  $g$ , nesse contexto, dedicou-se a entender o movimento circular do pêndulo (Joella Yoder). O problema de medir a aceleração da gravidade já havia sido proposto uns 15 anos antes de Huygens dedicar-se a ele, por Padre Marin Mersenne. A idéia de Mersenne era medir o tempo pelo número de oscilações de um pêndulo, cujo período fosse de 1 segundo; para isso, ele precisava do comprimento desse pêndulo (Joella Yoder).

## FIM BOX CURIOSIDADE

### 11.2.1 Analogia com o peso

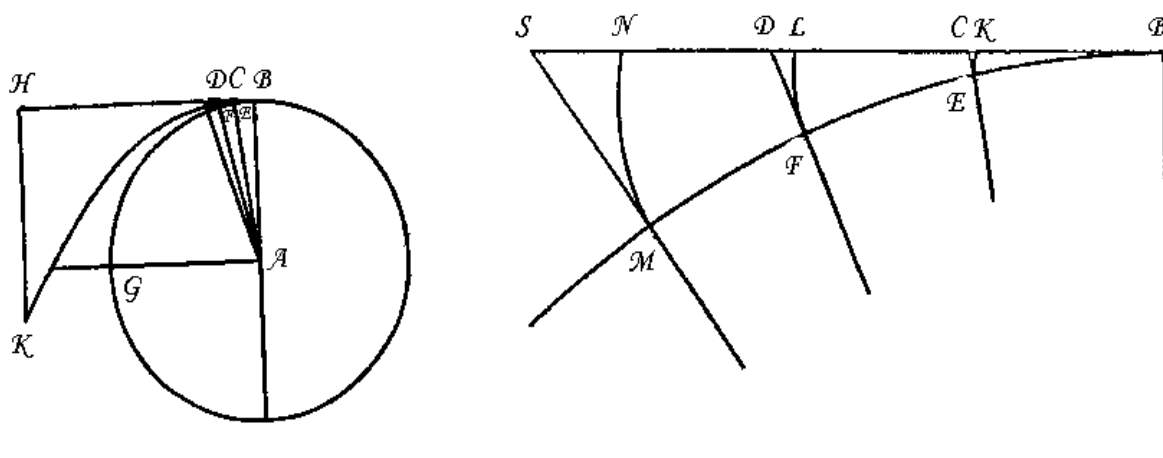


Figura 11.2: A “tendência” centrífuga (Huygens). A figura à esquerda mostra a roda. A figura à direita ilustra a aproximação feita por Huygens.

Para matematizar a “tendência” de afastar do centro de um círculo, Huygens fez uma comparação entre essa “tendência” e uma outra tendência, a que têm os corpos na superfície da Terra, de cair. Huygens cunhou a expressão *vis centrifuga* ou *força centrífuga*.

Considere a figura (*De Vi Centrifuga*, p.261), onde o círculo  $\mathcal{B}\mathcal{E}\mathcal{F}\mathcal{G}$  é uma grande roda vertical (pode ser a Terra), tal que uma pessoa possa estar de pé em  $\mathcal{B}$ , segurando um fio do qual pende uma esfera.

Quando a roda gira em torno de  $\mathcal{A}$ , caso a esfera se soltasse, ela se moveria ao longo da reta  $\mathcal{B}\mathcal{C}\mathcal{D}\mathcal{H}$ . Huygens argumenta que, para distâncias muito pequenas, a distância movido ao longo do círculo é igual à distância movida, no mesmo tempo, ao longo da tangente ( $\mathcal{B}\mathcal{C}\mathcal{D}\mathcal{H}$ ); portanto, no começo do movimento, a posição da esfera sobre a reta ( $\mathcal{C}, \mathcal{D}$ ) tende a se afastar

da posição do homem sobre a roda ( $\mathcal{E}, \mathcal{F}$ ) ao longo de uma reta que passa pelo centro da roda, pelo homem e pela esfera ( $\mathcal{E}\mathcal{C}, \mathcal{F}\mathcal{D}$ ).

Ora, se a pessoa não soltasse a esfera, ela e a esfera girariam sempre juntas e o fio estaria sempre tensionado pelo peso da esfera; portanto, a “tendência” de se afastar do centro da roda ( $\mathcal{E}\mathcal{C}, \mathcal{F}\mathcal{D}$ ) estaria, nesse caso, sendo anulada pelo peso; a “tendência” ( $\mathcal{E}\mathcal{C}, \mathcal{F}\mathcal{D}$ ) deve, pois, ser descrita de modo similar à “queda livre”:  $\mathcal{E}\mathcal{C} \approx t^2$ , etc. Posto isso, Huygens demonstra uma série de teoremas, que, juntos, significam, em notação moderna,  $\text{força centrífuga} = m\frac{v^2}{r}$ ; apesar de não possuir o conceito de massa, Huygens se refere à “quantidade sólida do corpo” (*De Vi Centrifuga*, p.266).

### 11.2.2 Paráfrase Moderna do Cálculo de Huygens

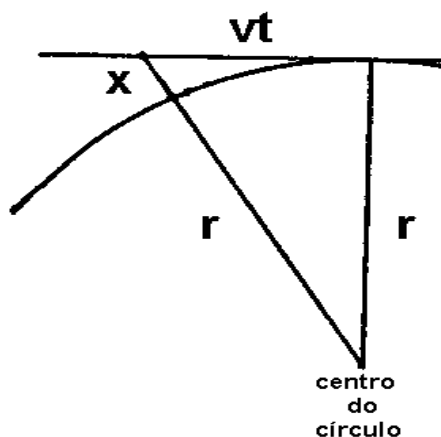


Figura 11.3: A “Força Centrípeta” e o Movimento Circular. “Ao final” de um espaço infinitesimal  $vt$ , a massa “cai em queda livre” a distância  $x$ , de modo a ficar sobre o círculo de raio  $r$ .

Uma leitura moderna e rigorosa do método de Huygens foi feita por Dijksterhuis (p.369). Considere a figura acima:

$$(x + r)^2 = (vt)^2 + r^2 \Rightarrow x^2 + (2r)x - (vt)^2 = 0 \Rightarrow x = r \pm r \times \sqrt{1 + \left(\frac{v^2}{r^2}\right) t^2}$$

$$x \approx -r \pm r \times \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{r}\right) \times \frac{1}{r} \times t^2\right);$$

o sinal  $+$  é escolhido, pois  $x \geq 0$ ; o sinal  $\approx$  significa o seguinte: Para  $y$  muito pequeno — como é o caso de  $y = \frac{(vt)^2}{r^2}$ , se  $(vt)^2$  for muito pequeno, quando comparado com  $r^2$  — nota-se que  $\left(1 + \frac{y}{2}\right)^2 = 1 + y + \frac{y^2}{4} \approx 1 + y$ , de modo que  $\sqrt{1 + y} \approx 1 + \frac{y}{2}$ . Logo:

$$x \approx \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{r}\right) t^2.$$

Esse resultado significa o seguinte: A tendência da massa é prosseguir em movimento linear uniforme, com a velocidade instantânea, tangencial. Logo, para que a massa tenha uma trajetória circular, ela tem de “cair”, em cada instante de tempo, tomado separadamente, da reta para o círculo. Ela o faz em *queda livre*, com aceleração (**instantaneamente**) uniforme  $\frac{v^2}{r}$ , ao longo da reta passando pelo centro do círculo. Portanto, a força tem de ser *centrípeta* e não *centrífuga*, como pensaram Descartes, Huygens e Newton (antes de seu *Principia*).

Para um movimento curvo qualquer, a *força centrípeta* é a componente da força que responde somente pela curvatura da trajetória, logo é a componente perpendicular à velocidade, portanto direcionada para o centro de curvatura e vale:  $\text{força centrípeta} = \frac{(\text{velocidade instantânea})^2}{\text{raio de curvatura}}$ . Os conceitos de *raio de curvatura* e *centro de curvatura* não são difíceis de entender: Dada uma curva qualquer, pode-se desenhar um círculo tangente a ela, em qualquer um de seus pontos; esse círculo tem o belo nome de *círculo osculador* (ósculo significa beijo), seu raio é o *raio de curvatura* e seu centro é o *centro de curvatura*.

## 11.3 O jovem Isaac Newton

### 11.3.1 O “conatus recedendi à centro” (c.1664-1665)

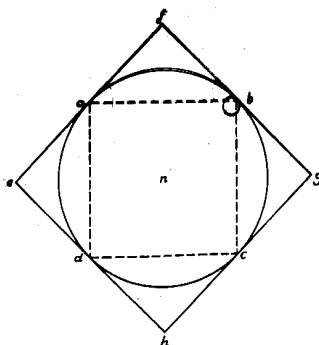


Figura 11.4: **O conatus.** Uma pequena esfera move-se dentro de um círculo. A esfera colide com o círculo — de dentro para fora, de modo que Newton pensa em termos de um efeito centrífugo — percorrendo o quadrado inscrito.

Newton demonstra (figura acima) (John Herivel, p.130):

$$\frac{\text{pressão da esfera sobre a tangente ao círculo em um percurso completo}}{\text{“força” do movimento}} = \frac{\text{perímetro do círculo}}{\text{raio do círculo}}.$$

Em notação moderna, isso é  $\frac{\Delta(mv)}{mv} = 2\pi$ , o que significa: Se  $\tau$  for o período,  $r$ , o raio e  $v$ , a velocidade em um movimento circular uniforme,  $\frac{\Delta(mv)}{\tau} = \frac{2\pi(mv)}{\tau} = m \left( \frac{2\pi r}{\tau} \right) \frac{v}{r} \equiv m \times \left( \frac{v^2}{r} \right)$ .

#### Demonstração

Da figura,

$$\text{triângulo } abd \sim \text{triângulo } afb$$

$$2fa = bd = \text{raio do círculo}$$

força do movimento  $\parallel ab$   
 pressão  $\parallel db \perp fg$ .

Logo:  $\frac{2fa}{ab} = \frac{ab}{fa} \equiv \frac{\text{"pressão" de } b \text{ em } fg}{\text{força do movimento}} \implies \frac{\text{"pressão" de } b \text{ em } fg}{\text{força do movimento}} = \frac{\text{lado } (ab)}{\text{raio } (fa)}$ . Após as 4 colisões, respectivamente em  $b, c, d$  e  $a$ :  $\frac{\text{"pressão" de } b \text{ em } fg}{\text{força do movimento}} = \frac{\text{perímetro}}{\text{raio } (r)} \xrightarrow{\text{número de lados} \rightarrow \infty} \frac{C}{r} \equiv \frac{2\pi r}{r} = 2\pi$ .

### 11.3.2 O movimento circular (1669)

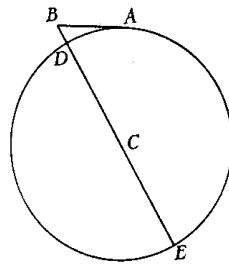


Figura 11.5: **Movimento circular (Newton)**. Da Geometria do círculo,  $(\overline{AB})^2 = (\overline{BD}) \times (\overline{BE})$ . Para pequeno arco  $\widehat{AD}$ , pode-se considerar  $\overline{BE} \approx \overline{DE} = 2r \implies (\overline{AB})^2 \approx (\overline{BD}) \times (\overline{DE})$ .

Considere a figura acima (Herivel, p.193). No tempo ( $t$ ) em que o corpo percorre o arco  $\widehat{AD}$ , com velocidade uniforme  $v$ , a “tendência centrífuga” faz com que o corpo se mova  $\overline{BD}$ , radialmente ( $\overline{AB}$  é percorrido no mesmo tempo). Em um tempo igual ao período ( $\tau$ ), o corpo percorre a circunferência ( $C = 2\pi r$ ), com velocidade uniforme  $v$ , logo:  $\frac{\overline{AB}}{C} = \frac{t}{\tau}$ . Newton coloca o problema de achar a distância  $x$  tal que:  $\frac{\overline{BD}}{x} = \frac{t^2}{\tau^2} = \frac{(\overline{AB})^2}{C^2}$ .

#### Cálculo

Da Geometria do círculo,  $\frac{(\overline{AB})^2}{C^2} \approx \frac{(\overline{BD}) \times (\overline{DE})}{C^2} \equiv \frac{(\overline{BD})}{\frac{C^2}{(\overline{DE})}} \implies x \equiv \frac{C^2}{(\overline{DE})}$ .

#### Interpretação

É possível tirar desse resultado uma conseqüência, que leva a uma interpretação moderna do cálculo de Newton:  $x \equiv \frac{C^2}{(\overline{DE})} \approx \frac{(v\tau)^2}{2r} = \frac{1}{2} \left( \frac{v^2}{r} \right) \tau^2 \implies \overline{BD} \approx x \times \left( \frac{t}{\tau} \right)^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{v^2}{r} \right) t^2$ ; assim, a distância **infinitesimal**  $\overline{BD}$  é percorrida com aceleração (instantaneamente) constante  $\frac{v^2}{r}$ : Em cada instante tomado isoladamente, o *conatus* é análogo a uma “força gravitacional”.



## Comentário

O uso do resultado de Galileu para a queda dos corpos, portanto, a analogia com a queda dos corpos, não significa que Newton estivesse interpretando  $BD$  como “queda”, isto é, como movimento em direção ao centro do círculo; na verdade, ele parece pensar em termos de um movimento de “afastamento” do círculo, como Descartes, antes dele, e como Huygens, seu contemporâneo. De acordo com Bernard Cohen, (1980, p.249):

Se ele [Newton] trabalhou, então [década de 1660 ou década de 1670, antes dos rascunhos do *Principia*] a relação entre a lei do inverso do quadrado e as órbitas elípticas, como, em geral, é suposto, hoje em dia, ele poderia tê-lo feito, possivelmente, em termos de “força centrífuga” em vez de “força centrípeta”; mas, à luz das sugestões reais de Hooke e do texto *De Motu*, parece mais provável que ele tivesse concebido a “força centrípeta” não mais tarde do que [1779-1780] [...].

## Novo resultado

Desses cálculos, Newton tira a seguinte consequência (John Herivel, p.197):

Finalmente, como, nos planetas primários, os cubos de suas distâncias ao Sol estão entre si na razão inversa dos números de revoluções em um dado tempo, a tendência de se afastar do Sol está na razão inversa dos quadrados das distâncias ao Sol.

Em termos modernos:

$$\begin{aligned} F &= m \times \frac{v^2}{r}; \quad v = \frac{2\pi r}{\tau} \text{ onde } \tau \text{ é o período e } \frac{r^3}{\tau^2} \text{ é constante, pela Terceira Lei, de Kepler.} \\ F &= m \times \frac{\left(\frac{2\pi r}{\tau}\right)^2}{r} \equiv m \times (2\pi)^2 \left(\frac{r^3}{\tau^2}\right) \frac{1}{r^2} \\ F &= m \times \text{constante} \times \frac{1}{r^2} \end{aligned}$$

Isaac Bernard Cohen (1980; 1981) argumenta que esse resultado indica que a expressão matemática da *Gravitação Universal*,  $\text{constante} \times \frac{1}{r^2}$ , não só era plausível, mas também conhecida, nos séculos XVII e XVIII. O mérito de Newton foi estender a idéia de um “poder” entre o Sol e cada um dos planetas, sugerido por Kepler, em um efeito universal entre massas (além, é claro, dos conceitos de *força*, *massa* e outras novidades).

## Referências

- Dias, Penha M. Cardoso (2006) “ $\vec{F} = m\vec{a}$ ?!! (O Nascimento da lei Dinâmica)”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **28** (2006), 205-234.
- Dias, Penha M. Cardoso (1998) “O Desafio do Círculo: descartes e o Demônio da Desilusão”, in: Saul Fuks (org.) *Descartes 400 Anos (Um Legado Científico e Filosófico)*, Relume Dumará.

- Dijksterhuis, Eduard Jan (1959) *The Mechanization of the World Picture*, 1959. Traduzido para o Inglês por C. Diskhoorn, Oxford University Press, 1961, 1969; Princeton University Press, 1986 (citações são dessa edição).
- Herivel, John (1965) *The Background to Newton's Principia*, Clarendon Press.
- Huygens, Christiaan (1673) *Horologium Oscillatorium*. Traduzido para o Francês, in: *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens*, Société Hollandaise des Sciences, 22 vols., 1888-1950, vol. XVI, 1929.
- Huygens, Christiaan (1703) *De Vi Centrifuga*. Publicado em Latim e traduzido para o Francês, in: *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens*, Sociedade Hollandaise des Sciences, 22 vols., 1888-1950, vol. XVI, 1929, p.255-301.
- Smith, George (2002) "The Methodology of the *Principia*", in: Bernard Cohen e G. Smith (editores), *The Cambridge Companion to Newton*, Cambridge University Press, p.57-84.
- Yoder, Joella (1988) *Unrolling Time: Christiaan Huygens and the Mathematization of Nature*, Cambridge University Press.

## Capítulo 12

# OS PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS DA FILOSOFIA MECANICISTA

### Meta da aula

Apresentar os “princípios matemáticos” da Filosofia Mecanicista.

### Objetivo da aula

Interpretar o conceito de ‘força’; descrever as funções de suas componentes *centrípeta* e *tangencial*. Usar os métodos usados por Newton para se convencer das categorias do mecanicismo.

### Introdução

Em 1687, Isaac Newton publicou seu livro *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*), no qual estabelece as categorias para o desenvolvimento de uma *Filosofia Natural* mecanicista: As três leis da Mecânica, os conceitos de *força*, *massa* e o tratamento de trajetórias curvas. Na última parte do livro, ele formula a *Lei da Gravitação Universal*. Nesse livro, ele estuda outras coisas, tais como marés, sistemas contínuos, mas, aqui, referimo-nos ao estabelecimento das categorias gerais descritivas da Física e não a problemas específicos.

Uma lenda em torno da descoberta da *Gravitação Universal* é o caso da queda da maçã. Na década de 1660, Newton retirou-se para o campo, para a estância de sua família, para fugir do surto de peste. Na ocasião, reza a lenda, ele tentava entender porque a Lua não se afasta da Terra; quando passeava em sua propriedade, observou uma maçã caindo de uma árvore; isso o teria feito pensar que, talvez, o “poder” responsável pela queda da maçã atuasse, também, na Lua, de modo que a Lua estaria continuamente “caindo” para a Terra, o que a impediria de se afastar. Segundo um eminente historiador, Isaac Bernard Cohen, na época da alegada queda da maçã, Newton não estava preparado para descobrir a *Gravitação Universal*, pois não possuía, ainda, as ferramentas conceituais que, de fato, o levaram a conceber a lei. Segundo Bernard Cohen, a lenda teria sido inventada pelo próprio Newton para fortalecer e tornar crível sua alegação de que a descoberta da *Gravitação Universal* ocorrera cerca de 20

anos antes de sua publicação no *Principia*. Newton envolveu-se em uma contenda com Robert Hooke pela paternidade da lei  $\frac{1}{r^2}$ ; Hooke afirmava que ele teria sugerido a lei a Newton, em uma correspondência que trocaram entre o fim de 1679 e o começo de 1680 e Newton antecipou a descoberta para antes da troca de cartas. Essa troca de cartas está na origem do *Principia*. E, aqui, tudo aponta para uma contribuição de Hooke.

#### COMEÇO DE BOX DE CURIOSIDADE

A Hooke é atribuída a invenção do microscópio composto, que consiste de lentes múltiplas. As suas outras realizações significativas incluem a invenção da junta universal, a construção do primeiro telescópio refletor gregoriano e a descoberta da primeira estrela binária. Quanto a sua relação com Newton, havia uma antipatia mútua. Tudo começou em 1672, quando Newton publicou o artigo “Nova teoria sobre luz e cores”. Hooke afirmava que Newton discutiu implicitamente a idéia de que a luz seria um corpúsculo, o que para ele era inconcebível. Hooke acreditava que a luz fosse constituída de uma série de pulsos não periódicos, propagados pelo éter.

#### FIM DE BOX DE CURIOSIDADE

No final dos anos 70, Hooke torna-se Secretário Geral da *Royal Society* e, aconselhado por seus pares, tenta uma aproximação com Newton, com quem havia tido uma altercação, anos antes. Em novembro de 1679, Hooke escreveu a Newton, convidando-o a comentar sobre um método de sua autoria para descrever movimentos curvilíneos. Newton respondeu a Hooke que esse método lhe era desconhecido e, em vez de comentar o método, propôs um novo problema; em linguagem moderna, o problema é o de achar a órbita de um corpo que se move sob uma força central constante, atrativa (isto é, seria  $\vec{F} = -mg\hat{r}$ ). A solução de Newton é uma curva espiralada e está, obviamente, errada. Hooke respondeu que (H. Turnbull, p.309) “[...] a atração está sempre em uma proporção dupla com a distância ao centro, reciprocamente [...]” (isto é,  $\frac{1}{r^2}$ ) e propõe que a solução, nesse caso, seja “uma espécie de elipsóide”. Newton não respondeu, mas corrigiu a solução de seu problema, obtendo uma órbita parecida com a solução correta. A correspondência entre os dois tem uma ou duas cartas a mais e pára.

Não muito tempo depois, em Londres, Hooke, Edmund Halley (o astrônomo que descobriu o cometa homônimo) e Christopher Wren (um famoso arquiteto e matemático) discutiam qual seria a órbita de um corpo, se o “poder atrativo” estivesse em uma “proporção dupla com a distância ao centro, reciprocamente”, a pergunta que motivou Hooke. Em 1684, Halley viajou a Cambridge, onde Newton vivia, para lhe fazer a mesma pergunta. Newton teria respondido, imediatamente, que, segundo seus cálculos, era uma elipse, porém não achou os cálculos. Halley insistiu, então, que ele escrevesse seus cálculos; o resultado, após alguns tratados menores, rascunhos do trabalho maior, foi o *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*.

Com uma leitura cuidadosa do livro de Newton e de seus cadernos de notas, I.B. Cohen (1980; 1981) propõe que:

1. Foi aplicando o método de Hooke que Newton aprendeu a tratar trajetórias curvas.
2. Newton chegou à *Gravitação Universal* por uma aplicação de sua *Terceira Lei*.
3. A *Terceira Lei* só foi formulada por ele no último rascunho do *Princípios*, por volta de 1685. Logo, a história da maçã é falsa, pois teria ocorrido 20 anos antes.

## 12.1 Método de Hooke

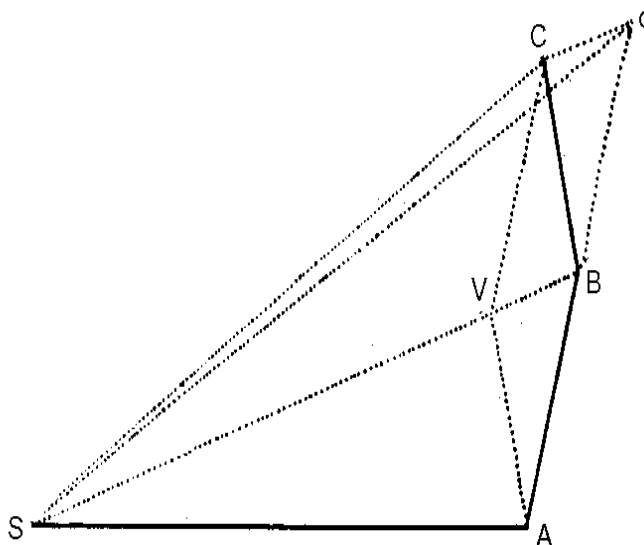


Figura 12.1: O método de Hooke.

O método de Hooke está ilustrado na figura acima. Se um corpo está em  $A$ , ele tem um movimento ao longo da tangente e vai para  $B$ , em um tempo  $\Delta t$  e, pela *Lei da Inércia*, ele vai para  $c$ , em um tempo igual:  $AB = Bc$ . Porém, em  $B$ , ele recebe um “movimento de atração” em direção a  $S$ . O novo “movimento” é  $AV$ ; em notação vetorial moderna,  $\vec{AV} = \vec{AB} + \vec{BV}$ ; traçando o paralelogramo  $AVCB$ :  $BC \parallel AV$  e  $BC = AV$ . Portanto, o corpo move, em  $\Delta t$ , de  $B$  para  $C$ :  $\vec{BC} = \vec{AB} + \vec{BV}$ . A órbita é formada a partir de dois “movimentos”:

1. Um “movimento”  $AB$  ao longo da tangente:  $\vec{AB} = m\vec{v}_{AB}$ .
2. Um “movimento de atração”,  $BV$ , da tangente em direção à curva, ao longo do raio vetor:  $\vec{BV} = \Delta(m\vec{v}_{AB})$ .

Os lados do paralelogramo ( $AB$  e  $BC$ ) são velocidades instantâneas e a diagonal ( $BV$ ) é a aceleração:  $\vec{AB} + \vec{BV} = \vec{AV} = \vec{BC}$ .

## 12.2 Construção do conceito de ‘força’

### 12.2.1 Fundamentos do mecanicismo

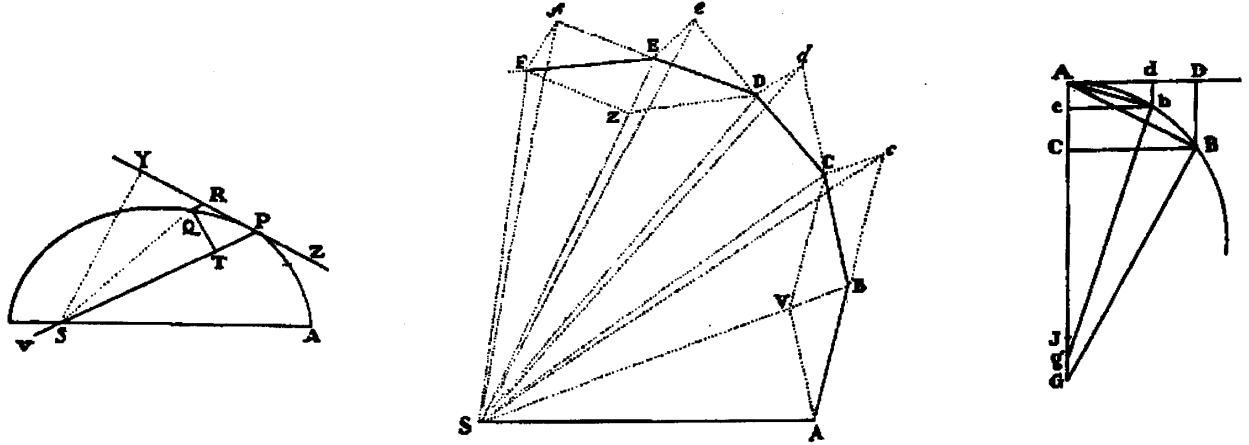


Figura 12.2: À direita: O círculo osculador. No meio: A *Lei das Áreas*. À esquerda: O problema direto ou achar a força, dada a órbita.  $S$  = centro de força;  $RQ$  = força central.

Os fundamentos da Dinâmica de uma massa puntual estão contidos nas proposições 1 a 41 do Livro I do *Princípios*:

1. O círculo na figura à direita, é o *círculo osculador* (raio  $R$ ). Algumas proposições geométricas são estabelecidas:

(i.)  $\overline{BD} \propto \frac{\overline{AB}^2}{2R}$ , onde  $\overline{AB}$  é a corda.

(ii.) No limite  $B \rightarrow A$ ,  $BD$  pode ser desenhado com qualquer ângulo com a tangente.

(iii.) *Sagitta* (B. Cohen, in: *Principia*, p.307): ‘Sagitta’ é o latim de ‘flecha’, mas Newton designa com essa palavra uma particular flecha. No caso geral, designa o segmento da linha do *centro de força* ao meio da corda  $AB$  (ou do arco  $\widehat{AB}$ ). No caso particular do *círculo osculador*, o centro do círculo funciona como “centro de força” e a *sagitta* é perpendicular a  $AB$ . Então:  $\text{sagitta} \propto \overline{BD} \propto \frac{\overline{AB}^2}{2R}$ .

2. No Corolário 3, Newton apresenta uma definição cinemática da *sagitta*. No limite, corda  $\overline{AB} \approx \text{arco } \widehat{AB} \approx v\Delta t$ ; então:  $\text{sagitta} \propto \frac{\overline{AB}^2}{2R} \approx \frac{(v\Delta t)^2}{2R} \equiv \frac{1}{2} \frac{v^2}{R} (\Delta t)^2$ .

3.  $\Delta t$  é dado pela área varrida pelo raio vetor (*Lei das Áreas*, em movimentos sob força central (figura do meio).

4. Por definição, força centrípeta  $\propto$  sagitta; ou, recordando o item 1, acima, a proporcionalidade é mais bem expressa assim: **força centrípeta**  $\propto \frac{\text{sagitta}}{(\Delta t)^2} \propto \frac{v^2}{R}$ .

5. No movimento *central*, a *sagitta* é  $\frac{BV}{2}$  (ela bissecta  $AC$ ) (figure 2, meio). Lemma 10 ou proposição 6 podem ser entendidos como uma demonstração de que os teoremas da queda na superfície da Terra ( $v^2 = 2gh$  e  $h = \frac{1}{2}gt^2$ ) podem ser aplicados a cada instante separadamente: área do triângulo  $ADB = \frac{1}{2} \times AD \times DB$  ou  $\Delta s = \frac{1}{2} (\Delta v) \times (\Delta t) \equiv \frac{1}{2} G (\Delta t)^2$ . Chamando a “distância de

queda” de *sagitta*, a *força central* é mais bem definida como: **força central**  $\propto \mathcal{G} \propto \frac{\text{sagitta}}{(\Delta t)^2}$ , onde  $\mathcal{G}$  é a aceleração (uniforme) da queda da tangente até a curva, ao longo do raio vetor.

6. Então Newton está preparado para resolver o *problema direto* e o *problema inverso*.

O *problema direto* consiste em provar que, se a órbita for uma elipse, então a *força central* (atrativa) é  $\propto \frac{1}{r^2}$ ; das propriedades geométricas da elipse junto com a definição de *força central* (item 5), é provado que (figura à esquerda) **força central**  $\propto \left\{ \frac{[(SP) \times (QT)]^2}{QR} \right\}^{-1}$ , onde o numerador é o tempo ao quadrado, dado pela área do triângulo  $SPQ$ , e o denominador é a *sagitta*.

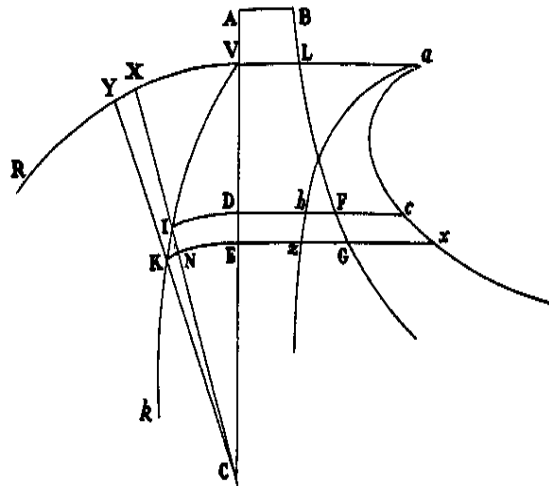


Figura 12.3: **O problema inverso.** As ordenadas  $AB$ ,  $DF$ ,  $EG$  são valores da força em  $A$ ,  $D$ ,  $E$ ; velocidade em  $E = v_E^2 \propto ABFGE$ ; tempo:  $t \propto VDba \propto VDca$ .

O *problema inverso* consiste em achar a órbita, dada a *força central*. A integração é feita geometricamente.

## 12.2.2 Definição de ‘força’

da estrutura acima, ‘força’ é caracterizada como se segue:

**Definição geométrica de ‘força’.** É a flecha  $BV$ .

**Definição física de ‘força’.** É proporcional à aceleração da “queda” da tangente ao círculo osculador, pela reta que liga o centro do círculo à posição do corpo na tangente (caso da *força centrípeta*); ou “queda” da tangente ao centro de força ao longo do raio vetor, com origem no centro de força (caso do movimento sob força central).

**Cálculo algébrico da ‘força’.** A força é achada usando os teoremas da “queda”. Isso requer:

1. Teoremas geométricos que justificam aplicação dos teoremas da “queda”,  $v^2 \propto h$  e  $s \propto \mathcal{G}t^2$ , em cada instante tomado separada e intermitentemente.
2. Cálculo do tempo de “queda”.

**Função da componente centrípeta da força.** Na estrutura conceitual no *Princípios*, a *força centrípeta* causa a curvatura; o movimento causado por essa força é a “queda” que encurva a tangente, de modo a fazê-la coincidir com o círculo osculador.

### Atividade

Usando o que você leu nesta aula sobre a concepção que Newton tinha do conceito de ‘força’, prepare uma apresentação do conceito de ‘força’ para seus alunos.

## 12.3 Da “Terceira Lei” à “Gravitação Universal”

No último rascunho que antecedeu ao *Princípios*, Newton formula a *Terceira Lei* (Bernard Cohen, 1981):

As ações de corpos que atraem e são atraídos são mútuas e iguais. Se existirem dois corpos, nem o atraído nem o que atrai podem estar em repouso.

Segundo Bernard Cohen, Newton compreendeu que, se o Sol atrai a Terra, a Terra deveria, também, atrair o Sol, com uma força igual, pela *Terceira Lei*. Analogamente, se cada planeta é atraído pelo Sol, então ele atrai o Sol, pela *Terceira Lei*. Então, cada planeta é um centro de força atrativa, também. Mas, se assim, cada planeta não só atrai como é atraído pelo Sol, mas também atrai e é atraído por cada um dos outros planetas.

A lei do inverso do quadrado seria, apenas, uma parte da *Gravitação Universal*. A descoberta importante — feita por Newton — é a interação mútua. Bernard Cohen argumenta que a forma  $\frac{1}{r^2}$  era suficientemente conhecida e é uma consequência da *Terceira Lei de Kepler*, junto com a expressão da *tendência centrífuga*; o argumento é o cálculo feito na aula 10, seção 3.2, sob o título “Novo resultado”.

## 12.4 O “estilo newtoniano”

Newton reconheceu que a interação gravitacional mútua implica que as leis de Kepler não são estritamente verdadeiras, mas válidas, somente, na situação ideal em que a Terra é reduzida a um ponto com massa e o Sol, sem massa, a um centro imóvel de força. De fato, o Sol também é atraído pela e para a Terra. Para lidar com situações reais, Newton procedeu de acordo com o que Bernard Cohen chamou de *estilo newtoniano*: Ele parte de uma construção abstrata e introduz novas condições, para adaptar à situação real.

## 12.5 E a “Segunda Lei”?

As três equações diferenciais

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x \qquad m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y \qquad m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z$$

foram escritas por Leonhard Euler, em meados do século XVIII. Como mostrado acima, Newton não as usou para resolver o problema das órbitas; seu tratamento do problema é geométrico e,



de fato, uma das críticas sofridas por Newton, que permeia a briga entre ele e Wilhelm Gottfried Leibniz pela paternidade do Cálculo, é que Newton não concebeu um cálculo analítico, mas geométrico. Mas, se assim, qual o valor da *Segunda Lei*, no aparato conceitual? Bernard Cohen responde a essa questão, argumentando que a *Segunda Lei* foi entendida e usada por Newton como uma definição, no caso, do efeito ( $m\vec{a}$ ) gerado pela causa ( $\vec{F}$ ) (Cohen, 1967). Segundo Cohen, Newton trata forças contínuas como uma seqüência de forças instantâneas, agindo intermitentemente. De fato, o tratamento do *problema inverso*, descrito nestas notas, onde Newton considera a força constante em cada instante separadamente é consistente com a leitura de Cohen.

## Atividade

Olhe no livro *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* como o próprio Newton formulou a *Segunda Lei*. Você nota algo estranho na formulação?

### Resposta

“A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida”. Não há referência ao *tempo* de atuação da força. Como mencionado no texto, Newton entendeu que o tempo de atuação da força entra no processo, mas não achou importante mencioná-lo: Por que? Não se sabe a resposta e o assunto é motivo de debate entre historiadores.

## Referências

- Cohen, Isaac Bernard (1967) “Newton’s Second Law and the Concept of Force in the *Principia*”, in: Palter, R. (editor) *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton (1666-1966)*, 143-185.
- Cohen, Isaac Bernard (1980) *The Newtonian Revolution (with illustrations of the transformation of scientific ideas)*, Cambridge University Press.
- Cohen Isaac Bernard (1981) “Newton’s Discovery of Gravity”, *Scientific American* **244**, 166-179.
- Cohen Isaac Bernard (2002) “Newton’s concepts of force and mass, with notes on the Laws of Motion”, in: I. Bernard Cohen e G. Smith (editores), *The Cambridge Companion to Newton*, Cambridge University Press, p.57-84.
- Dias, Penha Maria Cardoso; Santos, Wilma M.S.; Souza, Mariana T.M. (2004) “A gravitação universal (um texto para o ensino médio)”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **26**, 257-271.
- Dias, Penha M. Cardoso (2006) “ $\vec{F} = m\vec{a}$ ?!! (O Nascimento da lei Dinâmica)”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **28** (2006), 205-234.
- Newton, Isaac (1686) *Principia Mathematica Philosophiæ Naturalis*, in: I. Bernard Cohen e Anne Whitman (editores) (1999) *The Principia (Mathematical Principles of Natural Philosophy). A New Translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman assisted by Julia Budenz. Preceded by A Guide to Newton’s Principia*, University of California Press.
- Turnbull, H.W. (1960) *The Correspondence of Isaac Newton*, Cambridge University Press.

# Capítulo 13

## O CONCEITO DE FORÇA

### Meta da aula

Apresentar as críticas ao pensamento de Newton. Apresentar dificuldades filosóficas do conceito de ‘força’.

### Objetivo da aula

Exercitar-se no questionamento dos conceitos da Física; questionar o status epistêmico de conceitos.

### Introdução

(Secção baseada nas referências citadas em Dias)

O método de Newton não foi imediatamente aceito. A principal crítica foi feita à *Segunda Lei da Mecânica* e veio, sobretudo, da França. Deixando de lado a intolerância gerada pela camisa de força do cartesianismo, a principal dificuldade foi a *ontologia* do conceito de *força*.

Para muitos cartesianos, o conceito de *força* ecoava as qualidades ocultas do que se chamava o pensamento comum. Padre Pierre Mersenne, o líder do cartesianismo, clamava que só uma ciência descritiva do movimento seria possível, descartando a possibilidade de uma ciência que fosse capaz de chegar a verdades necessárias sobre o mundo. Esse ceticismo filosófico desenvolve-se na *Doutrina do Ocasionalismo*, cujo representante foi Nicolas de Malebranche: Empurrões e puxões são ocasiões para a ação de Deus; embora Ele seja consistente em seus atos, as leis são Sua escolha e há espaço para o milagre, logo não podem ser deduzidas *a priori*. Não é, pois, de se admirar que a Filosofia Natural, de Newton tivesse entrado na Europa continental pelas mãos dos holandeses, principalmente Wilhelm Jacob van 'sGravesande (a quem Voltaire chamava de o professor “cujo nome começa com um apóstrofo”) e Pieter van Musschenbroek.

No século XVIII, uma crítica importante foi feita por Jean Le Rond D’Alembert. Ele considerou que  $\vec{F}$  não é, senão, um nome para  $m\vec{a}$ , de modo que a quantidade  $\vec{F}$  não tem “vida própria”. Além disso, ele argumentou que é um princípio filosoficamente vazio igualar uma causa ( $\vec{F}$ ) a seu efeito ( $m\vec{a}$ ).

No século XVIII, foram desenvolvidos vários métodos para tratar sistemas dinâmicos. Esses métodos não necessariamente foram propostos como alternativa ao método de Newton, nem intendem eliminar o conceito de ‘força’.

## Atividade

Procure em um dicionário filosófico o que significa *ciência assertórica* e o que significa *ciência apodítica*.

## Atividades

Enuncie, com suas palavras, a doutrina do *Ocasionalismo*, de Malebranche.

### Resposta

Malebranche sustenta a teoria das “causas ocasionais”, segundo a qual todas as atividades da alma que parecem causar efeitos sobre o corpo e todas as ações do corpo sobre a alma são, na realidade, causas ocasionais, agindo unicamente pela eficácia da vontade de Deus. Deus seria, portanto, a única e verdadeira causa eficiente do acordo entre os movimentos do corpo e as idéias da alma.

## 13.1 Fundamentação do conceito de ‘força’

Para Newton, Deus teria de, constantemente, “dar corda” no Universo, pois forças de resistência estão sempre presentes. Descartes, em *O Mundo* e em *Princípios da Filosofia*, parece professar que suas três leis (aula 10) “dariam conta” de manter a “máquina” em funcionamento; porém, de acordo com o *Ocasionalismo*, Deus está sempre intervindo, de forma que as três leis, sozinhas não podem “dar conta” do Universo.

Gottfried Wilhelm Leibniz acreditava que a contínua operação da “máquina universal” demandava a conservação da “força” e, por seu turno, a conservação da “força” demandava que o efeito fosse sempre igual à causa. Ele clasificou “forças” como no quadro abaixo:

forças primitivas	ativa		enteléquia
	passiva		impenetrabilidade
forças derivadas	ativa	viva	$mv^2$
		morta	$\Delta(mv)$
	passiva		resistência

As “forças primitivas” são forças metafísicas. As “forças” que entram na Física são as “forças derivadas”. A “força morta” é aquela que age em equilíbrio, portanto é a “força” que age, somente no momento em que equilíbrio é quebrado. A “força viva” atua depois que movimento se estabelece.

## 13.2 Força morta

O modelo para a “força morta” veio da balança. A Estática já era estudada desde a Antiguidade Greco-romana. Ela era descrita pelo *Princípio da Alavanca* e um dos problemas

era justificar essa lei.

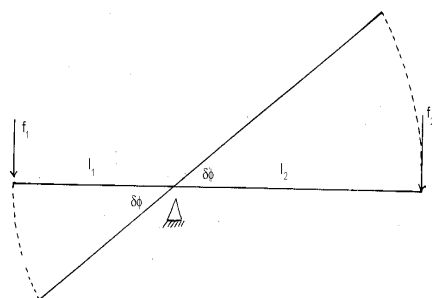


Figura 13.1: **A alavanca.** Os  $l_j$ 's são os *braços de alavanca*; os  $f_j$ 's são pesos aplicados nas extremidades, respectivamente; o ângulo de rotação é  $\delta\phi$ ; os  $s_j$ 's são os comprimentos dos arcos de rotação.

Considere uma balança em equilíbrio; o *Princípio da Alavanca* é:  $\frac{f_1}{f_2} = \frac{l_2}{l_1}$ . Suponha, agora, que a alavanca gire um ângulo infinitesimal  $\delta\phi$ :  $\delta s = l\delta\phi$ . Segue-se:  $\frac{f_1}{f_2} = \frac{l_2}{l_1} \equiv \frac{l_2 \times \delta\phi}{l_1 \times \delta\phi} = \frac{\delta s_2}{\delta s_1} \equiv \frac{\frac{\delta s_2 \times \delta t}{\delta s_1 \times \delta t}}{\frac{\delta s_1 \times \delta t}{\delta s_1 \times \delta t}} = \frac{\nu_2}{\nu_1}$ ; os  $\nu$ 's são *velocidades virtuais*, pois são, respectivamente, as velocidades com que os braços se moveriam no primeiro instante após equilíbrio ter sido quebrado. O *Princípio da Velocidade Virtual* é:  $\frac{f_1}{f_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1}$ . Se  $f = mg$ , então  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1}$  ou  $m_1\nu_1 = m_2\nu_2$ .

Do cálculo acima, quando equilíbrio se parte,  $\Delta(mv)$  é gerado; ora, a força que mantém a balança em equilíbrio é igual à que cancela o movimento gerado; portanto, a *força morta* deve ser igual ao “movimento” gerado, isto é,  $\Delta(mv)$ .

Leibniz e seu amigo e seguidor, Johann Bernoulli, deram uma interpretação de equilíbrio como um processo de criação e destruição de movimento: Por exemplo, considerando a balança, que é um sistema fácil de visualizar, em cada instante um lado da balança tende a cair, mas o outro braço também cai, destruindo o movimento gerado pelo primeiro braço. Essa leitura reforça o ponto que a *força morta* cancela o “movimento gerado” e deve ser igual a ele, mas oposta. Um outro exemplo considerado por Bernoulli é a de um livro sobre uma mesa: Em cada instante, o livro cai, mas a mesa empurra com uma *força morta*, que mantém o livro parado.

### 13.3 Força Viva

Leibniz buscava uma quantidade de “força do corpo em movimento” que se conservasse, sem a constante intervenção de Deus. Essa busca converteu-se em uma demonstração de que a “força cartesiana”, de fato, não se conserva. Descartes (aula 10) assumiu que a *quantidade de movimento* colocada por Deus, no Universo, não poderia ser alterada; portanto, a quantidade conservada seria, em entendimento moderno,  $mv$ , embora Descartes não tivesse o conceito de *massa* e, em vez de  $m$ , considerasse algo como “tamanho”.

A crítica de Leibniz a Descartes consiste em mostrar que a conservação de  $mv$  — a “força” cartesiana — leva a um absurdo. A situação absurda, construída por Leibniz, é a criação de movimento “a partir do nada” ou *ex nihilo*; um movimento *ex nihilo* é equivalente à auto-sustentação do Universo e não cabe no mundo leibniziano, onde não há efeito sem causa.

Para criticar Descartes, Leibniz imagina a situação da figura:

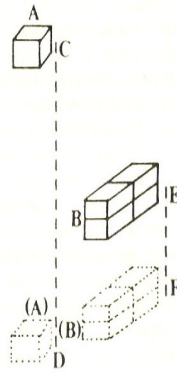


Figura 13.2: **Crítica a Descartes.** Dois corpos  $A$  ( $m_A = 1$ ) e  $B$  ( $m_B = 4$ ) partem do repouso, de alturas  $h_A = 4$  e  $h_B = 1$ . Ao final da queda,  $v_A \propto \sqrt{h_A} = 2$  e  $v_B \propto \sqrt{h_B} = 1$ .

Leibniz propõe que “força” seja medida pelo “efeito” que causa; no caso, o “efeito” deve fazer com que o corpo volte à mesma altura de onde caiu. Posto isso, ele assume que a mesma força seja necessária para elevar um corpo  $m_A = 1$  à altura  $h_A = 4$  e um corpo  $m_B = 4$  à altura  $h_B = 1$ . Ora,  $m_A v_A^2 = 1 \times 2^2 = 1 \times 4 = m_B v_B^2 = 4 \times 1^2 = 4 \times 1$ , enquanto que  $m_A v_A = 1 \times 2 = 2 \neq m_B v_B = 4 \times 1 = 4$ ; portanto, pela definição de Leibniz, a “força” deve ser medida por  $mv^2$ .

Além disso, a medida  $mv$  leva a um absurdo. Se os dois corpos,  $A$  e  $B$ , tivessem igual “força”, no sentido cartesiano, deveria ser:  $m_A v_A = 1 \times v_A = m_B v_B = 4 \times v_B \Rightarrow v_A = 4v_B \Rightarrow h_A = 16h_B$ . Portanto, como pelos dados do problema,  $h_B = 1$ , deveria ser  $h_A = 16$ , no entanto, pelos dados,  $h_A = 4$ ; de onde vieram as 12 unidades de altura exigida por Descartes? Outro modo de dizer a mesma coisa: Pelos dados do problema,  $v_A = 2$ , mas a medida de Descartes exige  $v_A = 4$ ; de onde vieram os 2 graus de celeridade? Para ambas perguntas a resposta é: *ex nihilo!*

## Atividade

Qual conceito da Física Clássica contemporânea seria mais próximo da “força do movimento de um corpo”, definida por Leibniz?

### Resposta

Energia Cinética. Mas note que Leibniz não formula o conceito de *energia cinética*; sua discussão dá-se em outro contexto conceitual.

## REFERÊNCIAS

- Cañedo-Argüelles, Juan Arana (1991) “Estudio Preliminar”, in: *Gottfried Wilhelm Leibniz, Escritos de Dinâmica*, Technos.
- Dias, Penha M. Cardoso (2006) “ $\vec{F} = m\vec{a}$ ?!! (O Nascimento da lei Dinâmica)”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **28** (2006), 205-234.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1692) *Sobre los Principios de la Filosofía*. Publicado em Espanhol por Editorial Gredos S.A., 1989.

- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1682) “On the elements of natural science”, in: E.L. Loemker (editor) (1989) *Gottfried Wilhem Leibniz Philosophical Papers and Letters*, Kluwer Academic Publishers.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1687) “Letter of Mr. Leibniz on a general principle useful in (explaining the laws of nature through a consideration of the divine wisdom; to serve as a reply to the response of Rev. Father Malebranche”, in: E.L. Loemker (editor) (1989) (*Gottfried Wilhem Leibniz Philosophical Papers and Letters*, Kluwer Academic Publishers.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1686) “Breve demostración del memorable error de Descartes y otros sobre la ley natural, por la que quieren que la cantidad de movimiento sea conservada por Dios siempre igual, de la cual abusan incluso en la mecánica”, in: Cañedo-Argüelles, J.A. (editor) (1991) *Gottfried Wilhelm Leibniz, Escritos de Dinámica*, Technos.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1695) “El Ensayo de dinámica sobre as leis do movimento”, in: Cañedo-Argüelles, J.A. (editor) (1991) *Gottfried Wilhelm Leibniz, Escritos de Dinámica*, Technos.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1686) *Discours de Métaphysique*, Gallimard, 2004.
- Gottlieb, A. (2007) *O Sonho da Razão*, Difel.