2

O Sol no centro do Mundo

No século XVI, em pleno Renascimento, muitas foram as figuras dedicadas ao estudo e valorização de referências da Antiguidade Clássica, em diversos domínios, com particular realce para a busca de explicação de uma estrutura do Universo. Nicolau Copérnico (1473--1543), cónego e astrónomo polaco, era grande admirador de Ptolomeu, mas achava o modelo ptolemaico demasiado complicado, face à convicção de que a Natureza deveria ser simples. Retomou a ideia antiga de Aristarco (c. 200 a. C.) de que o Sol ocupava o centro do mundo, concebendo um sistema heliocêntrico que descreveu no seu livro *As Revoluções dos Orbes Celestes,* publicado no ano da sua morte. Com este modelo, não só explicava as alterações observadas no céu ao longo das estações do ano, como dava claro entendimento das retrogradações dos planetas (figura 2) e das variações dos seus brilhos.

No entanto, porque destronar a Terra do centro do mundo colidia com a generalidade das crenças e convicções da época e de certo modo violava a doutrina da Igreja Católica, o heliocentrismo só foi sendo reconhecido à medida que surgiam novas observações.

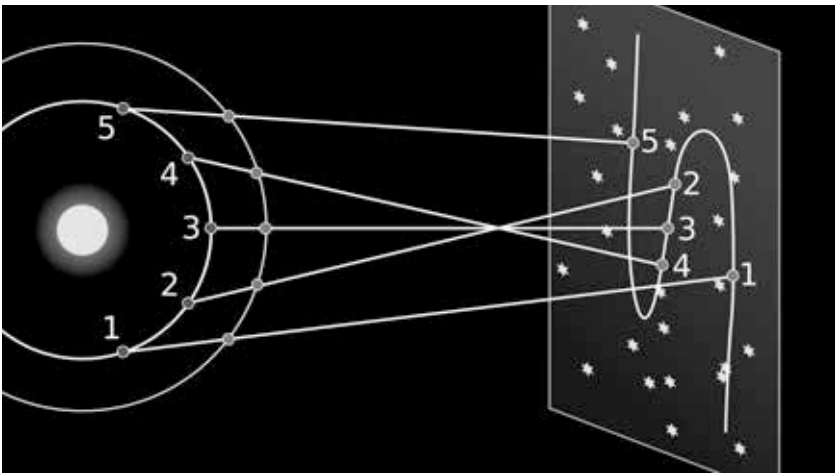

Figura 2 — Representação da órbita descrita pela Terra em redor do Sol, no sentido de 1 para 5 e, para além dela, a órbita de um planeta exterior, Marte, por exemplo. Na posição 1, o observador terrestre avista Marte em determinada posição da esfera celeste e vê-lo-á deslocar-se para a esquerda e iniciar a retrogradação um pouco antes da posição 2. Em 3 — deslocando-se agora para a direita — estará mais perto da Terra e, por isso, apresentará um maior brilho. Pouco depois da posição 4 termina a retrogradação e o planeta retoma o sentido habitual do seu deslocamento em relação às estrelas

Galileu Galilei (1564-1642), astrónomo e físico italiano, é considerado a primeira pessoa a usar um telescópio para observar o céu. Terá tomado conhecimento da existência de um instrumento constituído por lentes que permitia ver barcos e edifícios mais próximos do que na realidade se encontravam, o que lhe sugeriu a ideia de construir, ele próprio, um instrumento semelhante para observar o céu, pequeno telescópio que foi melhorando e, assim, tornando mais interessantes as observações que efetuava. A verificação de que a Lua estava cravejada de crateras, e mostrava montanhas e vales, e que o Sol apresentava pequenas manchas escuras que, por mudarem continuamente de posição, revelavam a rotação da estrela, deu-lhe a certeza de que os astros — apesar de esféricos — não eram perfeitos, como se pensava em épocas anteriores, e que

rodavam sobre si próprios. A observação de quatro pontos brilhantes girando em torno de Júpiter suscitou-lhe a ideia de que era uma miniatura do que o modelo de Copérnico sugeria para o conjunto formado pelo Sol e pelos planetas, ou seja, um pequeno *sistema solar*. Mas o argumento mais poderoso para a afirmação do heliocentrismo foram as fases de Vénus (figura 3) que Galileu observou e estudou minuciosamente, desenhando-as em ocasiões diversas, quando o planeta era observável de madrugada ou ao princípio das noites, quando se avistava perto do Sol ou quando se via mais afastado dele numa separação que não ultrapassava um certo valor. Os aspetos diferentes que apresentava e o tamanho aparente que os seus telescópios rudimentares mostravam, tornavam claro que só o sistema heliocêntrico podia justificar as observações.

Ao mesmo tempo que Galileu se tornava famoso pelas suas observações com telescópios, Johannes Kepler (1571-1630), astrónomo e matemático alemão, anunciou a sua descoberta de um conjunto de *leis* (figura 4), regras empíricas baseadas nas observações de Tycho Brahe (1546-1601), o seu mestre, que fez registos rigorosos de notáveis observações astronómicas. Após anos de insistência na obsessão de que as órbitas dos planetas seriam circunferências — tal como julgava Copérnico —, Kepler considerou, finalmente, que elas teriam a forma de elipses (circunferências ligeiramente «achatadas»),

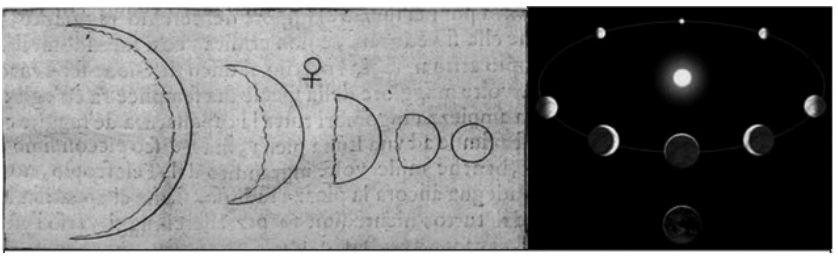

Figura 3 — À esquerda, as fases de Vénus vistas (e desenhadas) por Galileu, desde «cheio» até «minguante». À direita, as posições de Vénus vistas da Terra (em primeiro plano) e a prova de que só o modelo heliocêntrico justificava as observações

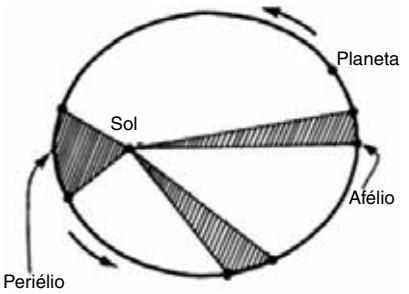

Figura 4 — Representação de uma órbita planetária, com a excentricidade da elipse exagerada. Devido à pequena excentricidade de uma elipse real, os focos deveriam estar mais próximos um do outro e perto da posição central

embora de pequena excentricidade, ocupando o Sol um de dois pontos notáveis no interior das elipses, designados por *focos*.

As *duas primeiras leis* de Kepler referem-se, a primeira, à forma das órbitas planetárias (elipses) e, a segunda, ao facto de — estando o Sol no foco e não no centro — qualquer planeta se mover mais rapidamente quando passa na região mais próxima do Sol (periélio) e mais lentamente na região mais afastada dele (afélio). Com a *terceira lei,* Kepler proporcionou o conhecimento de uma relação entre a distância média de um planeta ao Sol e o seu período orbital, ou seja, o tempo necessário para completar uma órbita em volta do Sol.

Ainda no século XVII, o físico e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727) fez um estudo aprofundado do movimento dos planetas e da respetiva causa. As leis deduzidas por Kepler, através das observações, mostravam «como» eles se movem, mas Newton procurou entender «porque» se movem! Estabeleceu a *«lei universal da gravitação»,* da qual resultava a explicação teórica das leis empíricas de Kepler. Tal como Kepler havia modificado o modelo de Copérnico, substituindo círculos por elipses, Newton corrigiu as leis de Kepler: dado que o Sol e um planeta exercem sobre si, mutuamente, uma força gravitacional, não só o planeta se move como também o Sol sofre um deslocamento, embora proporcionalmente mais pequeno! Em resultado, o planeta não orbita exatamente em torno do centro do Sol, mas ambos orbitam um ponto comum — designado por *centro de massa* —, o qual, para dois

corpos de massas muito diferentes, fica, geralmente, dentro do corpo mais massivo, neste caso o Sol. A partir de então, astrónomos e físicos passavam a dispor de uma ferramenta extraordinária que lhes permitia calcular a força de interação entre dois corpos que girassem em torno do respetivo *centro de massa* (situado entre os centros). Ela dependia da distância entre eles e da massa de cada um: uma *lei* mecânica que não só permitia descrever os movimentos dos corpos celestes como... *interpretar* o Universo!

É muito fácil obter o valor da massa do Sol com base no movimento da Terra à sua volta; a massa de Marte em função do movimento de uma das suas luas, em torno dele ou a massa de duas estrelas que constituam um binário estelar! Nestes cálculos, é costume utilizar-se unidades que não pertencem ao Sistema Internacional (SI) de Unidades, como $M_{\oplus}$ (massa da Terra)[2], quando o corpo maior é um planeta, ou $M_{\odot}$ (massa do Sol), quando o corpo maior é uma estrela.

[2] A relação de massas entre a do Sol e a da Terra é: 1 $M_{\odot}$ = 330 000 $M_{\oplus}$.

3

Distâncias em Astronomia

Unidade astronómica

Podemos tomar como 1 (ano) o período orbital da Terra e também como 1 a distância desta ao Sol. A esse valor se chama *Unidade Astronómica* (AU, do inglês *Astronomical Unit*). Assim, as distâncias de Mercúrio e Vénus ao Sol eram representadas por valores inferiores a 1, enquanto para todos os outros a sua distância era expressa por valores superiores a 1.

Tabela 1 — Distâncias médias entre os planetas e o Sol

	MERCÚRIO	VÉNUS	TERRA	MARTE	JÚPITER	SATURNO	ÚRANO[3]	NEPTUNO[4]	PLUTÃO[5]
AU	0,4	0,7	1	1,5	5,2	9,5	19,2	30,1	39,44

[3] Descoberto em 1781 por William Herschel (1738-1822).

[4] Descoberto em 1846 por Johann Galle (1812-1910).

[5] Descoberto em 1930 por Clyde Tombaugh (1906-1997).

Naturalmente, entre a comunidade de astrónomos crescia o desejo de determinar, em valores concretos, quantos quilómetros separavam cada planeta do Sol e foram constantes as iniciativas e conjeturas para o conseguir. Uma das primeiras ideias foi utilizar o método da paralaxe, observando o mesmo planeta de dois pontos da Terra, afastados o mais possível um do outro, e medir a diferença de posições em que o planeta se projetava na esfera celeste. Como em todas as tentativas a frustração foi total, rapidamente se percebeu que a Terra é demasiado pequena para que tais pontos se encontrem suficientemente afastados, de modo a ser possível medir o deslocamento da posição aparente do planeta, com os instrumentos disponíveis em épocas recuadas.

Desenvolveu-se então a possibilidade de observar a passagem de um planeta (Mercúrio ou Vénus) sobre o disco do Sol (fenómeno designado por trânsito) — também a partir de dois pontos na Terra —, tendo sido tomadas iniciativas nesse sentido a partir de 1631. Em novembro de 1677, o astrónomo inglês Edmond Halley (1656-1742) — mais famoso pelo cometa que recebeu o seu nome do que por projetar fortificações militares ou construir e testar uma espécie de submarino primitivo — encontrava-se na ilha de Santa Helena (no meio do oceano Atlântico, a oeste de Angola), com o objetivo de observar o céu do hemisfério sul e elaborar uma carta celeste com estrelas não visíveis a partir do hemisfério norte. Sabia que iria ocorrer um trânsito de Mercúrio a 6 desse mês e preparou-se para o observar, tendo reforçado a ideia de que só com um trânsito de Vénus seria possível concretizar o objetivo, particularmente por esse planeta ser maior do que Mercúrio, o que facilita a determinação dos momentos em que ele se coloca e sai da frente do Sol.

Porque um trânsito de Vénus é relativamente raro (ocorrem quatro em cada 243 anos, com intervalos irregulares, mas

bem conhecidos) — por exemplo, tendo ocorrido em 2004 e 2012, o próximo só acontecerá em 2117 —, todas as ocasiões dos últimos séculos têm merecido especial atenção por parte dos astrónomos, *tendo o valor da Unidade Astronómica vindo a ser retificado* progressivamente. Desde 2012 — após o trânsito de Vénus de 5/6 de junho daquele ano —, a União Astronómica Internacional estabeleceu que a AU equivalia a 149 597 870 000 metros.

Em circunstâncias que não envolvam muito rigor, é comum afirmar-se que Unidade Astronómica é «*a distância média entre a Terra e o Sol e tem o valor de 149,6 milhões de quilómetros*».

A unidade de distância em astronomia acabada de definir é, na perspetiva astronómica, muito pequena! Na verdade, ela só é útil para distâncias no âmbito do sistema solar, região do espaço que engloba, para além de outros planetas mais longínquos já conhecidos, a *nuvem de Oort*.

Ano-luz

O ano-luz é uma unidade astronómica de distância baseada na velocidade da luz no vazio, ou seja, cerca de 300 000 quilómetros por segundo. Embora o termo possa sugerir uma *unidade de tempo,* o ano-luz (a.l.) corresponde à distância percorrida pela luz, durante um ano.

É simples a determinação do seu valor: se tomarmos a duração de um ano como 365,24 dias e multiplicarmos esse número por 24 horas, concluiremos que um ano tem 8765 horas. Multiplicando esse número por 60 chega-se ao número de minutos (525 946), e outra vez por 60 chegar-se-á ao resultado de 31 556 736 segundos. Sabendo que a luz percorre — no espaço — 300 000 quilómetros em cada segundo, basta nova multiplicação (31 556 736 s x 300 000 km/s) para se

obter 9 467 020 800 000 km para o número de quilómetros correspondente a um a.l.

Dir-se-á que se trata de um número «muito grande»! No entanto, não existe nenhuma estrela que se encontre mais perto de nós do que o Sol. A mais próxima depois do Sol — uma estrela companheira da alfa do Centauro — está a cerca de 4,3 a.l. Se o leitor tiver curiosidade e paciência, bastará multiplicar o anterior valor do a.l. por 4,3 para obter os quase 40 biliões de quilómetros a que se encontra a estrela mais próxima do nosso sistema solar! Se começa a pensar que o espaço é quase totalmente vazio — dado que num raio de 12 anos-luz, a partir do Sol, só há 24 estrelas — concordará com António Gedeão ao escrever no seu poema «Máquina do mundo»: «*O universo é feito essencialmente de coisa nenhuma...*»

Não só porque um ano-luz é uma distância relativamente pequena, mas também porque é útil uma unidade baseada no método de observação, os astrónomos definiram uma outra unidade de distância, baseada na *paralaxe* que uma estrela (ou outro objeto celeste distante) apresenta a um observador terrestre quando o contempla em duas ocasiões, separadas por cerca de seis meses: na primeira, a estrela — representada com maior brilho, perto da parte central da figura 5 — é vista numa certa posição do céu. No entanto, como a Terra vai executando a sua translação em volta do Sol, à distância aproximada de 1 AU, parecerá ao observador que essa estrela se vai deslocando em relação ao pano de fundo onde se projeta. Medindo a porção de arco que a estrela pareceu descrever na esfera celeste, desde a posição no início da experiência até àquela em que é vista seis meses depois, obtém-se uma medida de que se deduz a paralaxe. Um processo geométrico e trigonométrico simples permite obter a distância do Sol à estrela.

De notar que os ângulos correspondentes à paralaxe são — em todos os casos — muito pequenos! Se o leitor observar uma paisagem ou, simplesmente, uma árvore ou um edifício

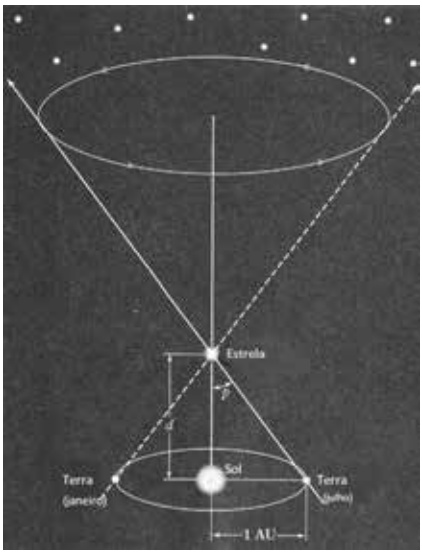

Figura 5 — Representação — muito «fora de escala» — do método de determinação da distância (*d*) a uma estrela próxima, pela paralaxe que apresenta a um observador terrestre. No cálculo intervêm a unidade astronómica (AU) e o ângulo de paralaxe (*p*), e ainda algumas simplificações, nomeadamente o facto de — mesmo em relação às estrelas mais próximas — a distância Terra-Sol ser insignificante, pelo que é indiferente considerar a distância estrela-Terra ou estrela-Sol

e esticar um dos braços, elevar o dedo polegar e o olhar com apenas um dos olhos, o dedo estará a ocupar o correspondente a 2° (figura 6). Ora, como cada grau contém 60 minutos de arco (60′), o seu dedo ocupará 120′. Mas a paralaxe é expressa em segundos de arco, e como cada minuto contém 60 segundos (60″), isso significa que o seu dedo cobre uma região correspondente a $120 \times 60 = 7200''$. Por incrível que lhe possa parecer, as paralaxes estelares que medimos a partir da Terra apresentam — todas elas — valores inferiores a 1″,

Figura 6 — O dedo polegar, visto com apenas um dos olhos e com o braço esticado, cobre cerca de 2°

ou seja, mais de 7200 vezes menores do que a largura do seu polegar! Daí que a determinação de distâncias astronómicas pelo método da paralaxe só seja aplicável — com algum rigor — a estrelas até 400 anos-luz de distância.

Na verdade, o ano-luz não é a unidade considerada «fundamental» das distâncias em astronomia. No Sistema Internacional (SI), essa unidade de referência é o chamado parsec, termo resultante da junção das três primeiras letras das palavras ***paralaxe*** e ***second*** (segundo, em inglês).

Então, o que é 1 parsec (cujo símbolo é pc)? É a distância a que se encontraria uma estrela cuja paralaxe seja de 1 segundo (1″) ou, o que é o mesmo, a distância a que se encontra uma estrela de onde um observador veria o semieixo maior da elipse correspondente à órbita da Terra segundo um ângulo de 1″. Como se referiu, não existe uma estrela tão perto como isso, estando a mais próxima — a α (alfa) do Centauro — a apenas 4,3 a.l., ou seja, a 1,32 pc.

Então, pode dizer-se que — no SI — o ***parsec*** (*pc*) é a ***unidade fundamental de distâncias astronómicas,*** sendo equivalente a **3,26 a.l.** Porque o *parsec* é também «demasiado pequeno», perante as distâncias a que se encontram os objetos celestes (excetuando os componentes do nosso sistema solar), esta unidade não possui submúltiplos, mas apenas múltiplos: kpc (quiloparsec = 1000 pc), Mpc (megaparsec = 1 000 000 pc), etc. Sintetizando o conjunto de unidades usadas para exprimir distâncias astronómicas, vem:

Unidade Astronómica (AU) = 149 600 000 km ($1{,}496 \times 10^{11}$ m)
Ano-luz (a.l.) = 9 467 020 800 000 km ≈ 9 500 000 000 000 km
(lê-se 9,5 biliões de quilómetros) = $9{,}5 \times 10^{15}$ m ≈ 63 260 AU
Parsec (pc) = 3,26 a.l. = 206 265 AU
Quiloparsec (kpc) = 3260 pc
Megaparsec (Mpc) = 3 260 000 pc