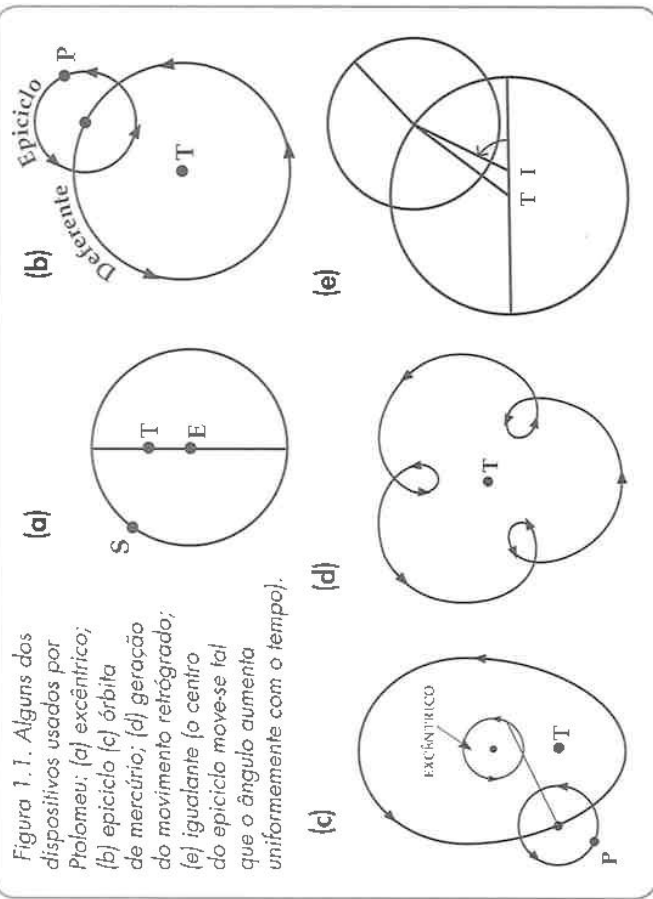


imagens em espelhos planos, esféricos e cilíndricos. Usou um disco, com sua circunferência marcada em graus, para medir os ângulos de incidência e reflexão. Apresentou uma tabela para esses ângulos para o caso onde raios de luz iam do ar para a água, do ar para o vidro e da água para o vidro, mas não chegou a escrever uma fórmula matemática que expressasse seus resultados.

Hoje sabemos que a idéia de Aristarco estava correta e a de Ptolomeu não. Mas a partir daí não podemos dizer que a "teoria" do primeiro era superior a do último. Uma teoria para ser levada a sério precisa explicar, se não todos, pelo menos a maioria dos fatos conhecidos, fazer previsões e ser expressa em uma forma matemática. O modelo de Ptolomeu preenchia, em parte, esses requisitos. Mesmo hoje se alguém apresentar uma idéia (por exemplo, que a velocidade da luz varia com o tempo) e não apresentar uma razão pela qual acredita nisso, não fazer previsões que possam ser verificadas experimentalmente e não formular um modelo preciso não será levado a sério. Mesmo que no futuro venhamos a descobrir que esse alguém tinha razão, o fato objetivo é que teve apenas uma idéia. Existem hoje centenas de idéias. Possivelmente poucas, ou até muitas, podem se mostrar corretas, mas não temos como averiguar quais são corretas se forem apenas isso: uma idéia.

2 A Física na Idade Média

Figura 1.1. Alguns dos dispositivos usados por Ptolomeu: (a) excêntrico; (b) epiciclo (c) órbita de mercúrio; (d) geração do movimento retrógrado; (e) iguante (o centro do epiciclo move-se tal que o ângulo aumenta uniformemente com o tempo).



No início do séc II a.C. teve início a influência romana sobre a Grécia, Ásia Menor e Egito, mas apesar da conquista, o ambiente cultural nas cidades gregas continuou e a Literatura, Filosofia e Artes gregas passaram a ser apreciadas pelos romanos. Vários eruditos gregos mudaram para Roma e tornou-se moda entre a elite aprender a língua grega. Porém os professores gregos ensinavam apenas aquilo que interessava aos romanos, principalmente temas de interesse prático tais como Matemática, Medicina, Lógica e Retórica, dado que os próprios romanos consideravam importante a aprendizagem prática mesmo, ou até como passatempo, pouco se importando com o pensamento abstrato; a ciência não era valorizada por eles e seu desenvolvimento ficou paralisado. A civilização romana, sofisticada, moderna em sua política e forte nas disciplinas do Direito, progressista na tecnologia militar e de higiene pública, com todo o acesso à ciência grega, no entanto, não conseguiu produzir um único cientista. Mas quando consideramos em quais poucas foram as culturas nas quais a ciência floresceu podemos considerar Roma como normal e a Grécia Clássica como o fenômeno a ser explicado. No final do séc II d.C., depois da morte do imperador Marco Aurélio,

o império romano passou por uma série de mudanças profundas, com agitações políticas, motins e disputas militares e o desastre econômico teve forte impacto na vida cultural. Com a invasão dos povos germânicos ao longo das fronteiras do império, a partir de 250 d.C., a cultura declinou mais ainda. Na segunda metade do séc III, o imperador Diocleciano dividiu o império em duas partes: ocidental e oriental. No ano 380 o cristianismo tornou-se a religião oficial, passando a ter forte influência sobre a Filosofia.

O clérigo mais erudito e influente, entre os primeiros filósofos cristãos, foi Santo Agostinho. Ele nasceu em 354 d.C. em uma pequena cidade na província romana da Numídia, na África, e mais tarde tornou-se bispo de Hipona. Ele não só deu ao cristianismo uma sólida base intelectual, como o vinculou à tradição filosófica grega. Foi influenciado por Plotino, um filósofo que viveu no séc III d.C., considerado o maior sucessor de Platão, mas que modificou tanto a filosofia do mestre que sua filosofia passou a ser conhecida como neoplatonismo. Uma das características do neoplatonismo é o desprezo por todos os ramos da ciência. Para Agostinho, o único tipo de conhecimento desejável era o conhecimento de Deus e da alma, para ele não havia proveito algum a investigação do reino da Natureza. Em 410 d.C. Roma foi saqueada pelos visigodos e a queda da cidade foi atribuída à perda da fé nos antigos deuses pagãos em favor do cristianismo e os cristãos foram culpados. Para contestar essa acusação Santo Agostinho escreveu *A Cidade de Deus*, sua grande obra de Teologia e Filosofia, considerada a Bíblia da idade média. Agostinho estava preocupado com a questão: se o mundo foi criado num dado momento, porque Deus permitiu que uma eternidade transcorresse antes da Criação? Respondeu que o tempo não existia antes da Criação. O tempo e o mundo foram criados juntos, mas Deus existe fora do tempo. Perguntar o que Deus fazia antes não tem sentido, não houve nenhum antes, Agostinho concluiu.

No final do séc V o Império Romano do Ocidente caiu invadido pelos bárbaros, dando início à Idade Média. Para a cultura em geral isso representou, em certos aspectos, uma volta ao barbarismo. Houve uma estagnação intelectual e um mergulho na ignorância e na credulidade. A ciência chegou ao seu ponto mais baixo na Europa Ocidental entre aproximadamente 500 d.C. e 1000 d.C., melhorando gradualmente até que obras gregas e árabes, no final do séc XII e início do séc XIII, introduzissem uma nova visão na literatura científica. Se pensarmos na ciência não há dúvidas de que a erudição caiu, em qualidade e quantidade, mas a erudição não desapareceu, e sim, voltou-se para a doutrina cristã.

No período que se seguiu o conhecimento clássico seria preservado na Europa ocidental pela tradição monástica. As abadias e os mosteiros se tornaram centros intelectuais, no entanto, a capacidade intelectual estava direcionada para fins religiosos. Os monges escreviam a maior parte dos livros, copiavam os manuscritos antigos e mantinham a maioria das escolas e bibliotecas. Os clérigos se tornaram sucessores dos filósofos da antiguidade e a Igreja passou a determinar o clima cultural. Poucos se interessavam pela Ciência ou Filosofia, exceto na medida em que esses assuntos pudessem servir para fins religiosos.

A partir do séc V alguns romanos manifestaram um certo grau de interesse pela ciência, começando a produzir seus próprios textos, mas em qualidade inferior à dos textos gregos correspondentes. A tradição de enciclopédias escritas em Latim havia começado no séc I a.C. com Marcus Varro, mas os principais expoentes foram Sêneca e Plínio no séc I d.C. Plínio escreveu sua *História Natural* em 37 volumes. Entre os sécs IV e VIII os autores de enciclopédias produziram uma quantidade enorme de textos que tiveram uma influência marcante durante a Idade Média, especialmente antes de 1200. Esses livros continham a totalidade do conhecimento científico de então, embora apresentassem uma massa de informações não sistemática, confusa e inconsistente. Em geral os autores copiavam material, repetindo e distorcendo compilações anteriores, com pouco conhecimento do que estavam escrevendo. Exceto por traduções ocasionais de textos gregos, que não circulavam, pouco foi acrescentado à tradição enciclopédica dominante.

A ciência entre os Árabes

Enquanto a tradição clássica declinava no mundo romano, a cultura clássica encontrou refúgio no chamado Império Romano Bizantino, que tinha Constantinopla como capital. Nessa parte havia um certo nível de estabilidade política e a tradição do estudo dos clássicos nunca desapareceu. No entanto, como no oeste, o estudo estava subordinado à teologia. Até mesmo o fechamento da Academia em Atenas em 529 d.C. pelo imperador Justiniano, marcando o fim da era greco-romana, foi considerado mais uma medida defensiva contra as tradições pagãs do que uma tentativa de destruir a tradição clássica grega. Entretanto, surgiram algumas obras voltadas para a filosofia natural. Para citar apenas um exemplo, no séc VI John Philoponus, que vivera em Alexandria, escreveu um comentário sobre a Física de Aristóteles.

Nele, entre outras coisas, ele refuta a teoria aristotélica do movimento, criticando a teoria de movimento de um projétil e a alegação de que um objeto pesado cai com a velocidade proporcional ao seu peso.

Uma centena de anos depois da morte de Maomé em 632 d.C., quase metade do mundo civilizado estava sob a dominação muçulmana. O império sarraceno estendeu-se das fronteiras da Índia até o Estreito de Gibraltar e os Pirineus. Em 762 d.C. foi construída Bagdá, a capital do Império Árabe, e no ano 800 d.C. Haroun Al-Raschid fundou nessa cidade uma escola de ciência. Nos sécs VII e VIII a corrente muçulmana colheu os restos da filosofia e ciência grega na Ásia menor e Alexandria, levando-os para a Europa. Do ano 800 até 1300 d.C. o árabe foi a língua dominante na Ciência e Filosofia, como o grego o havia sido nos séculos precedentes. A partir do séc XII, começaram a surgir fragmentos de trabalhos de Arquimedes, Euclides, Aristarco e Ptolomeu.

Os eruditos árabes estudaram e traduziram os manuscritos gregos salvos das bibliotecas helênicas, que foram parcialmente destruídas, desenvolveram a Álgebra, introduziram os algarismos arábicos, que tornavam as operações aritméticas mais fáceis de serem realizadas do que com o sistema romano. Havia, naquela época, dois sistemas rivais em Astronomia. Um era o sistema de esferas homocêntricas de Eudoxo e Calipus, adotado por Aristóteles. Teorias homocêntricas não reproduzem completamente os detalhes dos movimentos planetários e são incapazes de explicar a variação de brilho dos planetas. Essa variação era explicada como uma consequência da variação das distâncias entre os planetas e a Terra, mas um modelo homocêntrico por sua própria natureza excluía tais distâncias variáveis. Como resultado desses problemas esse modelo foi suplantado pelo outro, de Hiparco e Ptolomeu, mais flexível, mas mais complicado. Esse modelo tem a virtude de tecnicamente produzir boas previsões de fenômenos astronômicos, mas ao custo de uma suposição - que um corpo celeste pode ter movimento circular uniforme em torno de um ponto outro que o centro da Terra. Alguns astrônomos árabes tentaram modificar o primeiro sistema, introduzindo mais esferas para melhorar o acordo com dados de observação. Outros se dedicaram ao sistema de Ptolomeu, fazendo algumas correções, como deixar que os epiciclos rolassem em torno de seus deferentes. Alguns astrônomos islâmicos, como Averroes (Ibn Rushd, 1126-1198), questionaram os modelos geométricos que Ptolomeu inventara, alegando que ele não se ativera próximo da filosofia aristotélica, especialmente em relação ao movimento circular uniforme. Os árabes desenvolveram a trigonometria esférica, incluindo o

uso das seis funções trigonométricas, construíram vários instrumentos para observações astronômicas e aperfeiçoaram o astrolábio. Mas a procura do conhecimento por si só nunca foi apoiada pela ideologia religiosa islâmica, que não proibia a ciência grega, mas também não a apoiava. Havia pouco interesse pela Ciência ou Filosofia, exceto como já dito, na medida em que esses assuntos tivessem uma utilidade prática ou pudessem servir para fins religiosos. No séc XII, enfraquecido pelas invasões dos mongóis e a pilhagem dos cruzados, o império sucumbiu. Por essa época a Europa emergia lentamente do caos da Idade Média e a cultura renasceu.

O Renascimento científico no Oeste

O início do progresso intelectual da época feudal data da chamada renascença Carolíngia do séc IX. Foi um movimento iniciado por Carlos Magno ao trazer para a sua corte os mais notáveis eruditos que pôde encontrar. Com a reurbanização da Europa nos sécs XI e XII o nível educacional melhorou. Escolas urbanas começaram a surgir substituindo as escolas monásticas. Essas escolas tinham metas mais abrangentes do que as anteriores e um currículo mais variado: Lógica, Retórica, Teologia, Gramática Latina e o *Quadrivium* (Aritmética, Geometria, Música e Astronomia). Mesmo que a ciência não fizesse parte do currículo, ela se beneficiou do clima intelectual.

No ano 1100 d.C. as escolas urbanas eram pequenas, com poucos alunos. Mas a partir de então elas cresceram em número e tamanho. Não sabemos em detalhes como surgiram as primeiras universidades, mas a expansão do sistema educacional no nível elemental passou a exigir estudos de nível superior. Em Bolonha, Paris e Oxford surgiram escolas de Artes Liberais, Medicina, Teologia e Direito. Estudantes e professores se organizavam em associações voluntárias chamadas de *universitas*, um termo que originalmente não tinha qualquer conotação educacional (a palavra *universitas* em latim era aplicada no período medieval a corporações legais). Com o correr do tempo, o termo *universidade* passou a designar especificamente uma associação de professores e estudantes, dedicados a propósitos educacionais, cuja existência era reconhecida pela autoridade eclesiástica ou civil. As primeiras universidades surgiram gradualmente, mas é comum associar a fundação da Universidade de Bolonha ao ano 1150, Paris a 1200 e Oxford a 1220.



Carlos Magno

As primeiras universidades não tinham prédios permanentes, o que permitia que fossem deslocadas de um local para outro com relativa facilidade. Em geral, tinham uma escola de artes liberais e uma ou mais faculdades com finalidade profissional (Direito, Medicina ou Teologia). De início o estudante dedicava quatro ou cinco anos ao estudo do Trivium (Gramática, Retórica, Lógica). Se o estudante fosse aprovado em um exame final recebia o grau de bacharel em artes. Para conquistar um grau superior, como o de mestre em Artes, doutor em Direito ou Medicina, precisava estudar ainda mais. Para obter o grau de mestre em Artes tinha que estudar de três a quatro anos o Quatrivium. Algumas vezes o currículo de artes era complementado com Filosofia Moral, Filosofia Natural e Metafísica. Para o grau de doutor era exigida uma formação mais especializada, sendo um dos pré-requisitos o estudo de Artes. As universidades possuíam total independência acadêmica e os professores tinham liberdade de expressão e pensamento, mas a Filosofia de Aristóteles era a parte central do currículo. As universidades não eram controladas pela Igreja, mas os professores eram predominantemente ligados a ela. Como resultado a Teologia tinha um destaque especial. Aos poucos elas se tornaram instituições conservadoras, preservando a ênfase na pesquisa religiosa e resistindo à introdução de doutrinas não ortodoxas. Devido à diversidade dos eruditos as aulas eram ministradas em latim.

A Europa redescobriu Aristóteles através de traduções árabes, e do séc XII ao séc XVI a filosofia dominante mudou de Platão para Aristóteles. Surgiu uma atitude positiva diante da Natureza, um renascimento do pensamento científico. No entanto, algumas idéias e opiniões de Aristóteles estavam em conflito com a doutrina cristã. A crença de Aristóteles em um cosmo eterno negava o ato criativo de Deus. O Deus de Aristóteles movia o mundo, mas não intervinha em nada, não havia lugar para milagres. A idéia aristotélica de que a alma não sobrevivia ao corpo estava em confronto com a crença fundamental cristã da imortalidade da alma. O rigor nos debates filosóficos, estimulado pelas idéias aristotélicas, era uma ameaça para os conservadores. Surgiram vários debates entre os intelectuais. A lógica de Aristóteles era atrativa, o conteúdo de seus textos era vasto, abrangendo Psicologia, Meteorologia, Biologia etc. e explicava de uma maneira racional o funcionamento do Universo. O problema não era refutar os seus ensinamentos mas colocá-los de uma forma compatível com a teologia cristã. Os defensores de Aristóteles alegavam que a Filosofia pagã era um instrumento a ser usado para o benefício da religião e a ciência foi colocada como serva da Teologia.

Essa tentativa para harmonizar a razão com a fé, ou para fazer a Filosofia servir aos interesses da Teologia, passou a ser chamada de Escolástica. Historicamente pode ser vista como a coroação da Filosofia que fora preparada pelos platonistas de Santo Agostinho e pelas demais figuras do pensamento da Idade Média Alta, bem como da renascença carolíngia. A evolução do pensamento escolástico se processou em torno da questão dos "universais". Os chamados nominalistas afirmavam que os universais, ou conceitos abstratos, não eram meras palavras, mas tinham uma existência própria, real e independente. Alguns filósofos, por outro lado, sob a influência de Aristóteles, afirmavam que o Universo não era uma entidade capaz de existir em si mesma, mas era inerente a essência do objeto em particular. Essa doutrina é conhecida como realismo moderado. A Escolástica teve seu auge no séc XIII, sobretudo em consequência dos trabalhos de Alberto Magno e São Tomás de Aquino.

O primeiro a oferecer uma interpretação compreensível da Filosofia de Aristóteles para o mundo cristão foi Alberto Magno (1200-1280) nascido na Alemanha, educado em Colônia e Pádua. Complementou os textos de Aristóteles em assuntos que achava que haviam sido tratados de maneira superficial, corrigindo aquilo que julgava estar errado. Sua obra inclui mais de vinte volumes sobre os mais diversos assuntos. É dele a afirmação de que Deus é a causa de tudo, mas trabalha através de causas naturais e é dever do filósofo estudar essas causas. Tentou fundamentar suas conclusões na razão e na experiência, afirmando que a ciência natural não é conhecimento recebido dos outros, mas a investigação das causas dos fenômenos naturais. O trabalho de Alberto foi continuado por seu discípulo Tomás de Aquino.

Tomás de Aquino, considerado a mente filosófica mais refinada da Europa desde Santo Agostinho, nasceu perto de Aquino em 1225. Sua filosofia, mais tarde chamada de tomismo, foi logo adotada pela igreja e tornou-se a autoridade intelectual máxima. Em sua obra principal, *Summa Theologica*, tentou conciliar a filosofia de Aristóteles com a doutrina da igreja. Ele repetiu o argumento do Primeiro Motor associando a idéia de uma Causa primeira com Deus (a causa última das coisas). Tal argumento foi prontamente aceito pela Igreja, pois a prova aristotélica da existência de Deus dava suporte intelectual à sua doutrina. Sobre a eternidade do mundo ele afirmou que não é contraditório



Tomás de Aquino

dizer que o Universo foi criado (isto é, depende de um poder criativo divino para sua existência), mas no entanto, existe eternamente. Escreveu que a origem do nosso conhecimento está nos sentidos, mesmo para as coisas que transcendem os sentidos.

Tomás rejeitou o argumento ontológico (ontologia é o estudo das características básicas da realidade), formulado pouco mais de um século antes de seu nascimento por Santo Anselmo, que afirmava que a idéia de Deus é a maior que podemos conceber. Se essa idéia não existe, deve haver uma idéia ainda maior que também inclua o atributo da existência. Assim, a maior de todas as idéias deve existir, do contrário uma idéia ainda maior seria possível.

Tomás refutou a idéia do vácuo com o mesmo argumento usado por Aristóteles: um corpo colocado em movimento no vácuo continuaria a se mover indefinidamente. Mas disse que isso seria possível em um vácuo hipotético. Ao contrário de Aristóteles, afirmou que o movimento no vácuo exigiria um tempo não nulo, pois para ir de um ponto a outro o corpo deveria percorrer a distância interviniente. Acreditava, todavia, que mesmo um movimento no vácuo exigia a ação de uma força e de uma resistência. A resistência era fornecida pelo *corpus quantum* ou tamanho ou dimensão do corpo. Mas uma vez colocado em movimento no vácuo o corpo continuaria a se mover para sempre.

Roger Bacon (1220-1292), filósofo franciscano e reformador educacional, negou que tanto a razão como a autoridade pudessem fornecer conhecimentos válidos, a não ser quando baseados na pesquisa experimental. Fez trabalhos importantes em óptica relacionados com lentes de aumento. Foi o primeiro a usar explicitamente a expressão *leis da Natureza* no seu sentido moderno, quando falou de leis de reflexão e refração. Usou o termo *lei* para descrever regularidades na Natureza da maneira como hoje o fazemos. Segundo Bacon, todo ser finito era composto de matéria e forma. Os objetos do Universo, embora distintos uns dos outros quanto às suas substâncias, eram unidos em uma rede imensa de ações e reações recíprocas. Para explicar a propagação dessas "forças" usou o termo "espécies", um conceito obscuro que não chegou a ter uma definição precisa. Ele afirmou que a espécie não era emitida pelo agente, pois se o fosse o agente seria eventualmente consumido pela emissão. O agente excitava a atividade potencial do meio entre ele e o paciente, e finalmente a atividade potencial do paciente. O agente atuava naquela parte do meio que era adjacente a ele e esta parte, por sua vez, transmitia a espécie pela estimulação da energia latente das partes adjacentes e assim por diante. A transmissão da força era uma espécie de reação em

cadeia que excitava sucessivamente as partes consecutivas do meio. Por exemplo, a atração de um pedaço de ferro por um ímã era explicada pela noção de espécie: o ímã ativava na vizinhança uma *spécies magnetica* que espalhava através do meio até o ferro fazendo-o unir-se com o ímã e assim dando origem ao seu movimento. Da mesma forma ele explicava a ação da gravidade. Talvez influenciado pela doutrina aristotélica que dizia que o físico deveria classificar e não medir, Bacon pensava qualitativamente e não quantitativamente. Segundo o filósofo inglês Alfred Whitehead, por essa razão, Bacon deixou de ser um dos fundadores da ciência moderna.

Em 1277 um concílio religioso em Paris, presidido pelo bispo Etienne Tempier, condenou várias teses de Aristóteles, incluindo a visão de que um vácuo é impossível, que Deus não poderia criar universos adicionais e nem mover os corpos celestes em linhas retas. O concílio concluiu que Deus poderia fazer qualquer coisa que quisesse desde que não envolvesse uma contradição lógica. Atendo-se ao poder supremo de Deus, os escolásticos procuraram demonstrar que alternativas para uma grande variedade de explicações físicas de Aristóteles eram logicamente possíveis, e a posição dominante do sistema aristotélico não foi seriamente enfraquecida. A real importância desse edito para o desenvolvimento da ciência medieval é um tema que continua em debate até hoje.

No final do séc XIV a escolástica entrou em sua fase de decadência, marcada por discussões estereis e problemas secundários. O formalismo dialético levou o pensamento, negativamente para o misticismo, ou positivamente para o lançamento das bases do progresso científico da Renascença. Um nome de destaque desse período é Guilherme de Ockham (1285-1347), frade franciscano inglês. Ele fez a separação entre Filosofia e Teologia, mostrando que a Teologia não é ciência, já que as proposições teológicas dependem de premissas sustentadas apenas pela fé. Devido ao seu radicalismo na crítica dos dogmas da filosofia aristotélica, foi forçado a deixar a universidade sem obter o grau de mestre em Teologia. Seu famoso princípio *non sunt multiplicanda entia praeter necessitatem*, isto é, as necessidades não devem ser multiplicadas além da necessidade, passou a ser conhecido como "a navalha de Ockham", ou lei da economia. Este princípio foi usado, desde então, por vários físicos quando afirmam que as leis da natureza devem ser as mais simples possíveis e que devemos preferir as hipóteses ou teorias mais simples. Ockham parece ter sido o primeiro a fazer a distinção entre cinemática e dinâmica. Criticou a idéia de que "tudo que se move é movido por uma outra coisa".

Ockham estava convencido de que todo conhecimento é obtido a partir da experiência através da “cognição indutiva”. De tal percepção direta podia-se saber se alguma coisa existia ou não. Nenhuma demonstração se fazia necessária e nenhuma podia ser produzida para mostrar a existência de algo percebido dessa maneira. Para ele a certeza psicológica era indistinguível da certeza baseada em evidências objetivas adquiridas através dos sentidos. Afirmou que o conhecimento de uma coisa não nos permite inferir a existência de qualquer outra coisa. Ele não via justificativa para inferências a partir de experiências para aquilo que transcendesse a experiência. Essas idéias, em conjugação com a convicção de que o que não é observável não é real, caracterizaram sua filosofia como empiricismo radical.

Movimento, que Ockham definiu como um objeto tendo existências sucessivas em lugares diferentes sem repouso intermediário, não era uma realidade separada do corpo que se movia. Como o movimento não era um efeito desvinculado do corpo, ele não requeria uma causa, fosse do meio, fosse de uma força aplicada. A idéia de Ockham é um passo importante para se chegar ao princípio da inércia, pois se o movimento não requer uma causa, uma vez que ele existe ele poderá continuar para sempre. Ockham refutou também o conceito de espécie de Bacon e reconheceu explicitamente a idéia de ação à distância para a gravidade. Rejeitando o princípio aristotélico do contato imediato entre objeto motor e objeto movido, ele sugeriu que uma *similitudo virtualis* era suficiente para manter a continuação do movimento do objeto movido afastado do objeto motor, como era o caso da atração entre dois ímãs. A influência de Ockham no clima intelectual do séc XIV foi profunda e duradoura, produzindo uma tendência de aceitar o empiricismo como o fundamento de qualquer conhecimento verdadeiro. Pela ênfase no rigor lógico sem fazer exigências sobre implicações reais, ele encorajou uma tendência para a imaginação de todo tipo de possibilidades sem levar em conta a realidade física. Nicolau de Autrecourt, o mais proeminente e radical seguidor de Ockham, rejeitou o aristotelismo como inimigo da fé cristã, dizendo que todas as conclusões da filosofia natural de Aristóteles eram indemonstráveis, e portanto, inconclusivas. Ele defendeu o atomismo dos antigos gregos como uma explicação mais adequada para o Universo.

Jean Buridan (1300-1358), filósofo, professor na Universidade de Paris e discípulo de Ockham, apoiou a ênfase no empiricismo, mas discordou de que o conhecimento adquirido indutivamente a partir de observações e da experiência não podia fornecer uma certeza inteiramente adequada para as exigências da ciência natural. Disse explicitamente que se pela experiência não conseguimos descobrir um exemplo em que o fogo não é quente, a afirmação



Nicolau de Cusa

geral de que todo fogo é quente é justificada. Para ele, como para muitos outros, os princípios gerais obtidos através da indução eram fundamentais para o desenvolvimento da ciência. Buridan, como outros escolásticos, acreditava que diferentes hipóteses ou explicações podiam explicar igualmente bem (salvar as aparências) um dado fenômeno físico. Em tal caso, a realidade física não era uma exigência para o mecanismo da explicação. Buridan criticou a teoria de movimento de projéteis de Aristóteles dizendo que se o ar fosse o responsável pelo movimento seria mais fácil colocar uma pena em movimento do que uma pedra, mas o fato é que não conseguimos jogar uma pena tão longe quanto uma pedra.

Nicolau de Cusa (1401-1464), cardinal alemão, preferiu o neoplatonismo ao aristotelismo. Acreditava que o Universo não tinha centro e nem limites (não era infinito, e sim, não terminado). Para ele, a Terra não estava no centro do Universo nem em repouso. Afirmou que lugar e movimento não eram absolutos, pois dependiam do observador. Negava que a Terra, a Lua e os planetas se moviam em círculos perfeitos ou com velocidade uniforme e estava convencido de que os planetas eram feitos da mesma matéria que a Terra, mas negava a possibilidade de um tratamento matemático da natureza. Para os alquimistas, “peso” era uma propriedade acidental da matéria: um aumento de peso não era necessariamente associado com um aumento adicional de matéria. Contrariando esse ponto de vista, Cusa viu no ato de pesar (usando uma balança) o método mais confiável em pesquisa.

No final da Idade Média algumas das mentes mais criativas da Europa estavam abandonando o aristotelismo e aderindo a novas maneiras de pensar. A filosofia de Aristóteles, nas suas várias interpretações, continuou a ser ensinada nas universidades, mas ela havia perdido sua vitalidade e criatividade.

A cosmologia medieval

Aristóteles havia proposto uma Terra estacionária e essa idéia era aceita sem contestação, mas surgiram discussões filosóficas sobre a possibilidade de um movimento rotacional da Terra. A vantagem de tal movimento era eliminar a necessidade do movimento de rotação diário das esferas celestes.

Jean Buridan lembrou que os astrônomos observam movimentos relativos em vez de absolutos, e que um possível movimento rotacional da Terra não mudaria os cálculos astronômicos. Disse que não perceberíamos um movimento rotacional da Terra da mesma forma que uma pessoa em um navio em movimento, ao passar por outro navio em repouso, não poderia dizer qual navio está em repouso e qual está em movimento. A afirmação de que a Terra está em repouso ou movimento não poderia, portanto, ser feita apenas a partir de observações celestes, mas sim usando argumentos físicos. Em seguida diz que, ao lançarmos uma pedra para cima em uma Terra em movimento, a pedra não volta ao ponto de lançamento, pois enquanto ela está no ar a Terra terá se deslocado sob ela. Como uma pedra sempre retorna ao ponto de partida, podemos afirmar que a Terra não se move.

Alguns anos mais tarde, Nicolau de Oresme (1325-1382), bispo católico, economista e matemático, refutou o argumento de Buridan, usando o mesmo argumento do movimento relativo de navios. Ele disse que em uma Terra girando, enquanto a pedra está se movendo verticalmente para cima e depois, verticalmente para baixo, ela também está se movendo horizontalmente. Assim, a pedra tem dois movimentos simultâneos, vertical e horizontalmente circular e permanece sempre acima do local de onde foi lançada. Ilustrou esse argumento com um exemplo em um navio similar ao que Galileu usaria anos mais tarde.

Se um homem estivesse em um navio movendo-se rapidamente na direção leste sem saber do movimento, e se ele deslizasse sua mão em uma linha reta para baixo ao longo do mastro, pareceria para ele que sua mão estaria se movendo em um movimento retilíneo; assim, de acordo com essa opinião, pareceria que a mesma coisa acontece com uma flecha que é lançada diretamente para baixo ou para cima. Dentro do navio pode haver todo tipo de movimento - horizontal, em zigue-zague, para cima, para baixo, em todas as direções - e eles parecem ser exatamente o mesmo daqueles em que o navio estivesse em repouso. Então, se um homem nesse navio caminhasse para oeste menos rapidamente do que o navio estivesse se movendo para o leste, pareceria para ele como se estivesse se movendo para o oeste quando na verdade estaria se movendo para o leste, e similarmente como no caso precedente, todos os movimentos pareceriam o mesmo como se a Terra estivesse em repouso.

Sobre a afirmação de que se a Terra girasse haveria um vento forte, contra-argumentou dizendo que o ar girava com a Terra. A situação era análoga à de uma pessoa em uma cabine fechada em um navio em movimento. Mas no final, Oresme aceitou a visão tradicional de uma Terra estacionária, dizendo que esta era a vontade de Deus. É bom lembrar que naquela época não existia nenhuma prova de que a Terra estivesse em movimento. Mostrar que ela poderia estar girando não excluía a possibilidade de ela estar estacionária.

O estudo do movimento na Idade Média

As teorias do movimento na idade média eram uma mistura de conceitos. A própria idéia de movimento era bastante complicada, levando a várias discussões. Alguns acreditavam que o "movimento" não era uma coisa parada do corpo que se movia, mas apenas o corpo e os lugares sucessivos que ele ocupava. Outros sustentavam que existia algo mais, inerente ao corpo que se deslocava, chamado de movimento. Lembremos que Aristóteles e seus seguidores consideravam o movimento como um dos quatro tipos de mudanças e esperavam que a análise do mesmo seguisse as regras para as mudanças em geral. Buridan rejeitava a teoria de Aristóteles de movimento de um projétil, argumentando que se fosse verdade que o ar escorresse para a parte de trás do projétil, uma lança pontiaguda em ambas as extremidades se deterioraria antes de outra.

Uma análise mais quantitativa do movimento teve início no séc XIV com um grupo de filósofos e matemáticos do Colégio de Merton, em Oxford. Eles começaram fazendo uma distinção entre Cinemática e Dinâmica, afirmando que o movimento poderia ser estudado tanto do ponto de vista da causa quanto do efeito. A partir daí desenvolveram os fundamentos para tratar da Cinemática. Apresentaram a idéia de velocidade como um conceito ao qual podemos atribuir um valor numérico (mas a velocidade foi tratada como um conceito escalar), distinguiram velocidade de velocidade instantânea e definiram movimento uniforme (movimento com velocidade constante) e uniformemente disforme (uniformemente disforme), que é o movimento uniformemente acelerado. William Heytesburg (1313-1372) do Colégio de Merton definiu com precisão o movimento uniformemente acelerado como aquele em que se adquirem incrementos iguais de velocidade em períodos iguais de tempo. Definiu a

velocidade instantânea de maneira análoga àquela que faria Galileu três séculos mais tarde.

Como surgiu o conceito abstrato de velocidade como uma medida de movimento? Lindberg responde:

A idéia fundamental era que qualidades ou formas podiam existir em vários graus ou intensidades: não existe um grau único para quente ou frio, mas uma variação de intensidade, ou grau, indo do muito frio ao muito quente. Além disso, foi reconhecido que formas ou qualidades podiam variar do mesmo modo; isto é, elas podiam ser intensificadas ou enfraquecidas. Quando essa discussão geral de qualidades e suas variações foi transferida para o caso particular do movimento local a idéia de velocidade apareceu?

Um progresso considerável aconteceu com as representações geométricas de "qualidades". Uma análise bem elaborada foi apresentada por Oresme, que usou segmentos de retas para representar a intensidade de uma dada qualidade. Ele começou com o estudo da intensidade de uma qualidade em um ponto de um objeto. Consideremos, por exemplo, uma barra aquecida AF (figura 2.1) tal que a temperatura aumente uniformemente de uma extremidade à outra. A linha horizontal representa o objeto e o segmento vertical, em cada ponto na figura, representa a "intensidade do calor" naquele ponto. Consideremos agora um corpo em movimento com uma velocidade que varia no tempo. A linha horizontal neste caso, explicou Oresme, é a duração do movimento e a velocidade é representada na vertical.

A velocidade uniforme é representada por uma figura onde todos os segmentos verticais são do mesmo comprimento (figura 2.2). Na figura 2.3 temos um movimento uniformemente acelerado. Oresme identificou a "quantidade total" de movimento com a distância percorrida, que no diagrama dele era representada pela área da figura. Note que a área não era para ele igual à distância percorrida, mas uma medida da mesma. A velocidade como grandeza não tinha unidades. Somente a linha horizontal (o tempo) é uma quantidade no sentido métrico, enquanto que a linha vertical representa a intensidade de uma qualidade, quer dizer, em graus de "mais" ou de "menos". Ela não tem unidades, exceto no sentido

conceitual imaginário de uma gradação; um modo de medi-la não é apreendido. Para entender bem o conceito aristotélico envolvido, pensemos na variação de uma qualidade como o amadurecimento de uma fruta. A técnica descrita acima seria equivalente a representar graus de amadurecimento ao longo de uma vertical sem haver estabelecido uma unidade de medida. A intensidade de uma velocidade aumentava com a rapidez da mesma forma como o avermelhamento de uma maçã aumentava com o amadurecimento.

Figura 2.1.
Temperatura ao longo de
uma barra aquecida

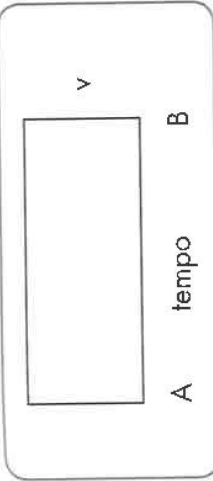
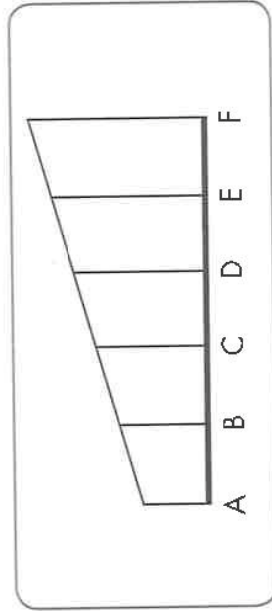


Figura 2.2.
Movimento retilíneo
uniforme.

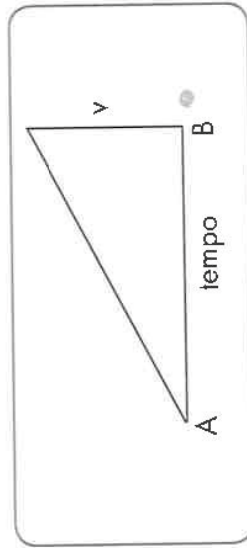


Figura 2.3.
Movimento retilíneo
uniformemente acelerado

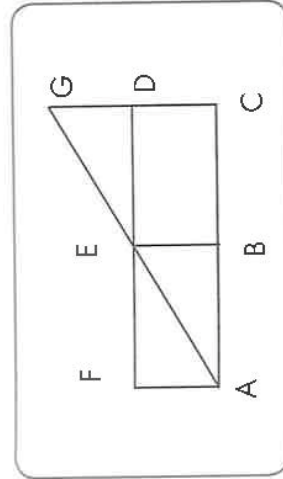


Figura 2.4.
Diagrama usado por Oresme
para demonstrar o
teorema da velocidade média

Oresme demonstrou, em torno de 1350, por meios geométricos, o teorema formulado pelos sábios de Merton (considerado por alguns historiadores como uma das contribuições medievais mais importante para a história da Física), que diz que um corpo movendo-se com movimento uniformemente acelerado percorre a mesma distância em um dado tempo que aquela que ele percorreria, caso se movesse com movimento uniforme e velocidade igual à velocidade média. A demonstração é simples. O movimento no primeiro caso é representado pelo triângulo ACC na figura 2.4, e sua velocidade média pelo segmento EB. O movimento no segundo caso é representado pelo retângulo AFDC. Como a área do triângulo AGC é igual à área do retângulo AFDC, e a distância percorrida é proporcional à área, o teorema fica demonstrado. Da figura 2.4 podemos demonstrar também outro teorema da escola de Merton, que diz que a distância percorrida na primeira metade de um movimento uniformemente acelerado é igual a um terço da distância percorrida na segunda metade (a área do quadrilátero BEGC é três vezes a área do triângulo AEB). Oresme generalizou essa relação ao indicar que as distâncias percorridas em intervalos de tempos iguais, sucessivos, em um movimento uniformemente acelerado estão entre si na razão 1:3:5, etc. (a série de números ímpares começando com 1), o que pode ser facilmente demonstrado considerando a área sobre a curva em cada intervalo de tempo. Desse teorema segue-se um resultado importante. Consideremos cada segmento AB, BC, ... (no eixo do tempo e estendendo a figura 2.4) como igual à unidade de tempo, e o triângulo AEB como unidade de distância. No primeiro intervalo de tempo temos, por definição, $t = 1$, $d = 1$. No segundo intervalo $t = 2$, $d = 4$ (a soma das áreas nos dois intervalos), no terceiro $t = 3$, $d = 9$, mostrando que a distância percorrida é proporcional ao quadrado do tempo. Outra contribuição de Oresme foi a distinção entre velocidade linear e velocidade angular. Escreveu que em um movimento circular a velocidade linear mede-se pela distância linear que o corpo percorre, mas a velocidade rotacional indica-se mediante os ângulos descritos ao redor do centro do movimento.

Os filósofos medievais lidavam com os problemas relacionados ao movimento de uma maneira hipotética, sem fazer qualquer tentativa para relacioná-los com movimentos reais na Natureza. Mas é justo dizer que naquela época seria muito difícil, por exemplo, determinar experimentalmente se um dado movimento era uniformemente acelerado ou não. No entanto, nos meados do séc XVI o espanhol Domingo de Soto (1494-1570) associou o conceito de movimento uniformemente acelerado com a

queda dos corpos e afirmou que a distância percorrida pelo corpo em queda poderia ser calculada a partir do tempo transcorrido usando o teorema da velocidade média.

Dinâmica

No séc VI Philoponus (como foi mencionado anteriormente) criticou fortemente a idéia de movimento de Aristóteles. Ele refutou a afirmação de Aristóteles de que o tempo de queda de um corpo caindo através de um meio é inversamente proporcional ao seu peso. Escreveu que um argumento baseado em observações reais é muito mais efetivo do que qualquer argumento verbal:

Se deixarmos cair da mesma altura dois pesos, um dos quais é muitas vezes mais pesado que o outro, veremos que a razão dos tempos necessários para eles chegarem ao chão não depende da razão dos pesos, mas a diferença em tempo é muito pequena. Assim, se a diferença nos pesos não é grande, isto é, se por exemplo um é o dobro do outro, não haverá diferença no tempo, ou ela será imperceptível, embora a diferença nos pesos não seja desprezível quando um corpo pesa o dobro do outro³.

Philoponus rejeitou também a idéia de Aristóteles de que um meio podia ao mesmo tempo sustentar e resistir ao movimento de um projétil, dizendo que o movimento complicado exigido do ar para que isso acontecesse era altamente improvável. Em seguida, comentou que não era o ar que fornecia a força motora para o projétil, pois se isto fosse o caso não seria necessário que a pedra estivesse em contato com a mão, ou a flecha com a corda do arco. Propôs a idéia de que todo movimento, natural ou forçado, é o resultado de motores internos. Ele afirmou que quando um projétil é lançado, um "poder motor incorpóreo", algumas vezes denominado *virtus impressa*, é comunicado a ele fazendo com que ele continue em movimento. Este "poder" não persiste indefinidamente, diminuindo gradualmente mesmo no vácuo. Ele é destruído também pela resistência do meio e pela tendência natural do corpo. Em resumo, Philoponus substituiu a força motora devida ao ambiente, proposta por Aristóteles, por uma força motora interna comunicada originalmente ao corpo pelo agente que o colocou em movimento. Como o

historiador Floris Cohen chamou a atenção, ontologicamente os dois conceitos estão em total desacordo um com o outro: um explica algo para o qual o outro nega a necessidade de uma explicação.

Avicena (980-1037) apresentou a idéia de uma força impressa que dependia do peso do corpo no qual atuava. Em sua teoria, essa força resiste a mudanças no estado de movimento do corpo e persiste indefinidamente no vácuo, mas como um movimento que dura para sempre não existe na Natureza, concluiu que o vácuo não existia. Avempace (Ibn Bajja- 1106-1138) filósofo árabe espanhol, defendeu as idéias de Philoponus e refutou a afirmação de Aristóteles de que o tempo de queda de um corpo é diretamente proporcional à densidade e, portanto, à resistência do meio através do qual ele cai. Disse que essa afirmação seria verdadeira somente se o tempo necessário para um objeto se deslocar de um ponto a outro fosse devido somente à capacidade resistiva do meio interveniente. Mas Aristóteles, por outro lado, havia observado que planetas e estrelas, da mesma forma que os corpos terrestres, não se deslocam instantaneamente de um ponto a outro. Porém ele havia dito que os corpos celestes se movem sem esforço através do éter que não oferece qualquer resistência. Era, portanto, óbvio que velocidades planetárias diferentes podiam ocorrer sem a existência da resistência ativa de um meio. Avempace concluiu que não somente a resistência de um meio era desnecessária para a ocorrência do movimento, como sua única função era retardá-lo.

A idéia de uma força impressa para explicar o movimento de projéteis foi rejeitada por vários filósofos, entre eles os do Colégio de Merton, que argumentavam que o meio deveria fornecer a "potência" para o movimento do projétil. A teoria foi retomada em 1320 por Francisco de Marchia, que propôs uma versão na qual a força impressa incorporada, ou *virtus derelicta* como ele a chamou, era uma força temporária e auto-dissipativa capaz de mover um corpo contrariamente à sua inclinação natural. Nesse processo o ar continuava a exercer um papel subsidiário, pois quando um corpo era colocado em movimento o ar em torno, segundo ele, recebia também uma força impressa que ajudaria no movimento do corpo. Os trabalhos desse autor podem ter influenciado Buridan, que apresentou uma teoria mais elaborada segundo a qual o projetante transfere ao projétil uma qualidade permanente, que ele chamou de *impetus* e que era a responsável pela continuação do movimento do projétil ao longo da direção imposta sobre ele de início. De certa forma, o *impetus* podia ser considerado como uma internalização da força motora que Aristóteles tomara como externa. Afir-

inou que o *impetus* de um corpo era proporcional à velocidade deste e à sua quantidade de matéria. Mas o *impetus* era a causa do movimento e não uma medida do mesmo. Buridan pensava que o *impetus* era de natureza permanente e só se corrompia pela interferência de outras forças ou devido à resistência externa. Relacionou o processo ao calor ganho por um atizador colocado no fogo. Quando o atizador é removido do fogo ele retém alguma coisa que o mantém quente. Lentamente o que quer que tenha sido adquirido do fogo se exaure e o atizador esfria. Ele supôs que, se toda resistência ao movimento pudesse ser removida, um corpo colocado em movimento se moveria indefinidamente e, presumivelmente, em uma linha reta com velocidade uniforme. Essa idéia lhe pareceu absurda em um Universo que ele acreditava finito, levando-o a negar a possibilidade de movimento no vácuo. Para ele, um corpo em queda livre estava sobre a influência da gravidade e do *impetus*:

No começo, somente a gravidade provoca o movimento; mas logo imprime um impetus ao corpo. Então, o movimento é causado pelo impetus juntamente com a gravidade. É assim que o movimento se acelera e, à medida que aumenta a velocidade, o impetus se torna mais intenso⁴.

Notemos que o *impetus* difere fundamentalmente da inércia como explicação para o movimento de um projétil depois que ele é arremessado, pois o *impetus* era uma força motriz interna comunicada originalmente ao corpo pelo agente que o colocou em movimento. Para Buridan o *impetus* também se aplicava ao movimento circular (usou a rotação de uma pedra de moinho para ilustrar a permanência dessa força). Aplicou a idéia à dinâmica celeste, afirmando que a causa do movimento no céu é um *impetus* que Deus impôs em cada uma das esferas celestes ao criar o mundo. O *impetus*, nesse caso, não diminui, segundo ele, porque não há resistência capaz de corrompê-lo. Ao ser aplicado ao movimento dos planetas o *impetus* forneceu um elo entre a dinâmica terrestre e a dinâmica celeste, tornando-se Buridan, nesse sentido, um predecessor de Copérnico e Galileu. Segundo alguns historiadores a teoria do *impetus* – embora incorreta – representou o primeiro passo na história da revolução científica. Discípulo de Buridan Alberto da Saxônia aceitou essa idéia como uma "força" auto sustentada e também a teoria do *impetus* circular. No caso de um corpo em queda observou, no entanto, que a resistência, aumentando mais rapidamente do que

o *impetus* era adquirido, limitava a velocidade do corpo. Foi ele, aparentemente, o primeiro a fazer uma distinção, embora de maneira intuitiva, entre massa e peso. Complementando a tese de Aristóteles, propôs que era o centro de gravidade de um corpo que aspirava alcançar o centro do Universo. Disse que quando um homem caminha na superfície da Terra sua cabeça move-se mais rapidamente do que seus pés.

Oresme continuou o trabalho de Buridan, mas acreditava que o *impetus* se consumia por si mesmo e dependia da aceleração e da velocidade do corpo. Mesmo os adeptos da teoria do *impetus* acreditavam, porém, que um projétil se movia em linha reta até que essa força tivesse exaurido, e só então se encurvava rapidamente caindo verticalmente para o solo. No final do séc XIV Blasius de Parma, estudando choques de corpos, rejeitou a teoria do *impetus* e falou da persistência do movimento:

E isto é evidente porque quando um corpo pesado encontra um corpo rígido e rebate em uma direção contrária, uma qualidade tal como o movimento não pode ser destruída instantaneamente⁵.

Como elementos leves e pesados, acreditava-se, deviam mover-se por suas próprias naturezas em sentidos opostos, e como havia surgido a prática de designar graus a cada um dos elementos (terra, água, ar e fogo) em um corpo composto, chegou-se à idéia de que peso e leveza eram forças atuando em sentidos contrários, ou seja, qualidades dentro de um mesmo corpo composto. A qualidade com o número maior de graus era, portanto, designada de força motriz e sua oposta de resistência interna. Na queda de um corpo, peso e leveza funcionavam como força motriz e resistência interna respectivamente. No movimento para cima os papéis eram invertidos. Se dois corpos compostos eram comparados tais que em um o peso excedesse à leveza de seis para dois e em outro de seis para quatro, era razoável supor que o corpo com menor grau de leveza cairia com maior velocidade.

Dentro do contexto da física medieval e restrito aos corpos compostos, a resistência interna parecia ser a maneira mais razoável de justificar o movimento natural no vácuo. A partir daí um resultado interessante foi derivado por Thomas Bradwardine (1290-1343), matemático do Colégio de Merton e arcebispo de Canterbury. Ele concluiu que dois corpos homogêneos de tamanhos diferentes e, portanto de pesos diferentes,

cairiam no vácuo com velocidades iguais. Isso porque unidades de matéria em um corpo composto homogêneo são idênticas umas às outras e, portanto, cada unidade de matéria tem a mesma razão entre elementos pesados e elementos leves (ou seja, a mesma razão entre a força motora e a resistência interna).

Pelo que se sabe, Bradwardine foi o primeiro a fazer uma análise matemática detalhada do movimento, isto é, procurar uma relação dinâmica entre força, resistência e velocidade. Enquanto que para Aristóteles a natureza da resistência era algo obscuro, os escolásticos a consideravam como uma força. Bradwardine começou dando uma formulação matemática a cada uma das alternativas então existentes e refutando cada uma delas, chamando a atenção para as conseqüências absurdas e inaceitáveis. Ex-pressou essas alternativas em palavras, ou em termos de razões, mas por simplicidade vou usar aqui a notação moderna. Primeiro ele tinha a versão de Aristóteles de que a velocidade era proporcional à razão entre a força aplicada e a resistência do meio:

$$v \propto F/R.$$

Mas essa relação não fornece $v = 0$ quando a força é igual ou menor que a resistência. Ela prevê movimento para $F = R$, o que é absurdo. Vemos também que a velocidade fica infinitamente grande quando a resistência é reduzida a zero (lembramos que Aristóteles usou este argumento como prova da inexistência do vácuo).

Philoponus havia feito uma revisão da formulação aristotélica, sugerindo que a velocidade deveria estar relacionada com a diferença entre a força e a resistência e não ao seu quociente, isto é:

$$v \propto (F - R).$$

Esta formulação prevê corretamente que quando $F = R$ a velocidade é nula. Seguindo essa concepção, a velocidade de um corpo no vácuo é diretamente proporcional à força. Esta idéia foi aceita por Avempace e por São Tomás de Aquino. Mas essa formulação não pode ser correta, Bradwardine escreveu, pois ela contradiz a afirmação de Aristóteles de que dobrando a força e a resistência, a velocidade não muda. Havia uma terceira alternativa proposta pelo filósofo muçulmano Averroes (Ibn Rushd, 1126-1198), que na linguagem que estou usando ficaria:

$$v \propto (F - R)/R,$$

a qual, porém, apresenta também alguns problemas. Bradwardine, buscando uma alternativa, procurou por uma relação tal que quando $F = R$ a velocidade seria nula (evitando assim uma fórmula em função de diferenças aritméticas). A solução que encontrou foi que a razão F/R devia aumentar geometricamente à medida que a velocidade aumentasse aritmeticamente. Fez os cálculos usando a linguagem complicada das proporções. Em linguagem moderna diríamos que as razões F_1/R_1 , F_2/R_2 guardam entre si a relação:

$$F_2/R_2 = (F_1/R_1)^n$$

onde $n = v_2/v_1$ e $F_1/F_2 > 1$. Podemos apresentar este resultado de uma forma mais adequada (e moderna) escrevendo:

$$v = \log_a (F/R), \text{ com } a = F/R,$$

(o conceito de logaritmo foi introduzido mais tarde por Neper, no séc XVII). Vemos que quando $F = R$ temos corretamente $v = 0$. Essa formulação de Bradwardine era bem mais complicada que as anteriores, e conquanto mais sofisticada, não passava de uma simples formulação matemática sem fazer uso de qualquer fato experimental. Por outro lado, a ambigüidade existente nos termos "força" e "resistência" ainda não havia sido resolvida. No entanto, segundo Max Jammer, a introdução da relação acima significou um passo importante para a auto consistência matemática da Mecânica.

Para finalizar, é importante mencionar uma importante escola italiana do séc XVI da qual fazem parte Niccolo Fontana Tartaglia e Giovanni Batista Benedetti. O primeiro negava que um mesmo corpo pudesse mover-se simultaneamente com movimento natural (como o de queda) e violento (como a projeção), e o segundo, embora concebesse essa possibilidade, afirmava que à medida que o *impetus* impresso pela projeção diminuía, a gravidade intervinha gradualmente, mantendo a idéia de que quanto maior a velocidade conferida pela projeção tanto menor era a gravidade do corpo projetado. Para explicar o movimento de uma pedra lançada por uma funda, Benedetti substituiu o *impetus* circular de Buridan por um *impetus* retilíneo. Escreveu:

Um corpo pesado é lançado mais longe com uma funda do que com a mão, porque, à medida que a funda gira, imprime-se ao corpo um impetus maior do que apenas com a mão. Quando o corpo deixa a funda e move-se por si mesmo, segue uma trajetória tangencial na última revolução da funda... sob a influência do impetus adquirido.

Conclusão

Além do que foi apresentado neste capítulo, uns poucos outros filósofos fizeram trabalhos significativos relacionados com a Física na idade média. Um dos mais originais foi Adelardo de Bath, no início do séc XII, que escreveu sobre a natureza humana, Meteorologia, Astronomia, Botânica e Zoologia e, no seu atomismo, afirmava a indestrutibilidade da matéria. No início do séc XIV Theodoric de Freiberg propôs uma explicação para o arco íris, usando a idéia de reflexão e refração, que é próxima da teoria correta.

Houve progresso também na Astronomia. A partir do final do séc XII, os conhecimentos astronômicos passaram a ser mais disseminados e vários livros textos foram escritos. Alguns suplementavam o trabalho de Ptolomeu com diagramas geométricos, mas a idéia central era sempre o geocentrismo. Em 1450, George Peurbach (1423-1462), um astrônomo alemão, escreveu um texto didático intitulado *Nova Teoria dos Planetas* (impresso em 1475) no qual apresentou um modelo simplificado da teoria de Ptolomeu. No lugar dos diagramas representando linhas geométricas, apresentou esferas sólidas de espessuras finitas. O movimento do Sol em um deferente se transformou no Sol dentro das paredes de uma esfera deferente que, por sua vez, estava embebida em uma esfera maior que abrangia a Terra. Os planetas eram tratados usando técnicas similares, mas mais complicadas. Peurbach acreditava que seu modelo não era apenas um dispositivo matemático, mas tinha realidade física. O trabalho de Peurbach foi continuado por seu discípulo Johannes Mueller (1436-1476), mais conhecido como Regiomontano, matemático, astrônomo prodígio e figura central no renascimento da Astronomia. Regiomontano publicou o livro *Epítome do Almagesto*, que escrevera com Peurbach, de onde Copérnico tirou muita coisa sem fazer referência.



Johannes Mueller

Neste ponto se faz interessante a apresentação de um tema curioso do ponto de vista histórico. Quando astrónomos árabes no séc IX compararam suas observações com aquelas de Ptolomeu, fizeram duas descobertas importantes: uma verdadeira e outra falsa. Primeiro, encontraram que a obliquidade da eclíptica era menor do que tinha sido antes. Segundo, verificaram que a taxa de precessão dos equinócios era mais rápida. O fenômeno da precessão variável, chamado de trepidação, originou-se em erros de observação, passados através de gravações de astrónomos entre Ptolomeu e Copérnico. Copérnico aceitou o fenômeno como verdadeiro e montou um mecanismo elaborado para explicá-lo (como vemos no capítulo seguinte). Tycho Brahe (de quem dou mais detalhes no próximo capítulo) foi o primeiro a perceber que os movimentos complexos das estrelas fixas não eram reais, mas advinham da falta de apreciação para os erros de observação. Um mecanismo foi proposto para explicar essas mudanças. O astrónomo Thabit ibn Qurra envolveu a oitava esfera com uma nona esfera, que foi chamada de "primus mobilis". Lembremos que a esfera das estrelas fixas, ou firmamento, era a oitava. O Sol, a Lua e os cinco planetas conhecidos ocupavam as esferas inferiores. A nona esfera, na teoria de Thabit, era a responsável pela rotação diária do cosmos, cujo movimento ela comunicava às esferas inferiores. Thabit sugeriu que os equinócios (aparentes) da oitava esfera moviam-se em círculos pequenos centrados nos equinócios (verdadeiros) da nona esfera. O efeito desse movimento oscilatório, ou trepidação, era aumentar e diminuir alternativamente o movimento de precessão da nona esfera. No séc XIII, a precessão total desde o tempo dos antigos gregos chegou a um valor grande o suficiente para fazer do movimento proposto por Thabit difícil de ser mantido sem mudanças e uma precessão estacionária foi proposta. A superposição de um "movimento oscilatório" a um movimento estacionário para frente dava origem à taxa de precessão variável. Como na física aristotélica um corpo podia ter somente um movimento, a adição de uma precessão estacionária exigia a introdução de uma décima esfera. Assim, o movimento da oitava esfera era a trepidação, o da nona a precessão e o da décima a rotação diária. Posteriormente uma décima primeira esfera, habitada por Deus e seus eleitos, foi acrescentada.

É importante dizer que a Astronomia tinha em geral pouca conexão com a Cosmologia, havendo uma clara distinção entre esses dois ramos do conhecimento. A Astronomia era uma disciplina técnica relacionada com a observação e a análise matemática do movimento dos corpos celestes. A Cosmologia, por outro lado, era o domínio dos teólogos e filósofos naturais, que

em geral careciam de formação matemática. A Cosmologia medieval estava interessada na natureza do céu e nas causas dos movimentos dos corpos celestes, deixando os detalhes desses movimentos para os astrónomos. Nas universidades, a filosofia natural lidava com as causas e natureza das coisas e tinha um status superior ao da Astronomia. Os "físicos" (ou melhor, os filósofos naturais) desconsideravam os conceitos usados pelos astrónomos, e por sua vez os astrónomos ignoravam a compatibilidade entre a Física e a matemática do movimento dos astros, restringindo-se ao cálculo desses movimentos sem se preocuparem com as suas causas.

A Matemática tinha um status ambíguo no meio acadêmico do séc XVI. Foi levantada a questão se os métodos de prova geométrica poderiam ser reconciliados com os padrões aristotélicos de uma ciência demonstrativa. Aristóteles havia considerado o silogismo como a ferramenta de raciocínio ideal e a mais poderosa. Para muitos, uma disciplina que empregasse esse modo de raciocínio era mais importante, mais confiável e de padrão mais elevado do que uma que não o fizesse. Os detratores da Matemática como uma ciência afirmavam que as demonstrações matemáticas não eram comparáveis ao silogismo, pois em uma demonstração verdadeira, de acordo com Aristóteles, as premissas levam às causas próprias da conclusão. Os críticos sustentavam que esse não era o caso com respeito a uma demonstração geométrica e viam as demonstrações da geometria euclidiana como construções arbitrárias que não apresentavam qualquer conexão com as conclusões e que não atendiam aos padrões superiores da Filosofia natural.

A questão do legado da ciência medieval para a ciência moderna é um tema de discussão. Há os que consideram a Idade Média como um período de estagnação científica e outros que dão um valor exagerado à sua contribuição. Lindberg⁷ assume uma posição intermediária e aponta as que ele acredita são as contribuições medievais mais importantes. Primeiro, ele diz que os estudiosos do período final da Idade Média criaram uma tradição intelectual, na ausência da qual o progresso ulterior na Filosofia natural seria impossível. Em segundo lugar, diz ele, os filósofos europeus procuraram entender o conteúdo do vasto conhecimento filosófico ganho dos gregos e árabes. Em terceiro, aponta o apoio intelectual das escolas e universidades que surgiram naquela época. Em quarto lugar menciona as discussões e críticas feitas sobre a filosofia aristotélica e finalmente a revisão completa da teoria de movimento de Aristóteles.