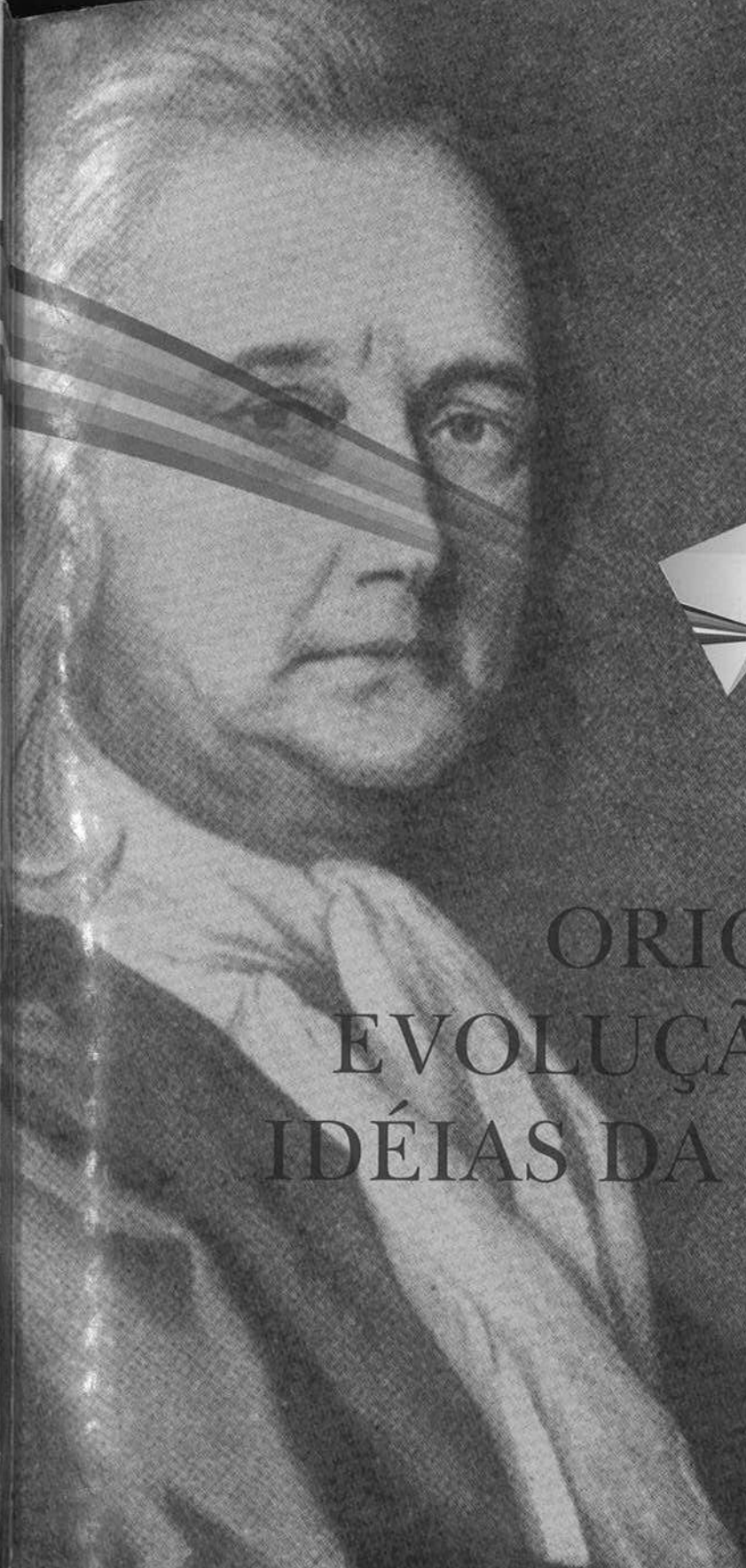




ORIGENS E EVOLUÇÃO DAS IDÉIAS DA FÍSICA



José Fernando Rocha (Org)

Roberto I. Leon Ponczek

Suani T. Rubim de Pinho

Roberto F. Silva Andrade

Olival Freire Júnior

Aurino Ribeiro Filho

ORIGENS E EVOLUÇÃO DAS IDÉIAS DA FÍSICA

ISBN 85-232-0254-4



9 788523 202545





UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Reitor
HEONIR ROCHA

Vice-Reitor
OTHON JAMBEIRO



EDITORA DA UFBA

Diretora
FLÁVIA M. GARCIA ROSA

Conselho Editorial

Antônio Virgílio Bittencourt Bastos
Arivaldo Leão de Amorim
Aurino Ribeiro Filho
Cid Seixas Fraga Filho
Fernando da Rocha Peres
Mirella Márcia Longo Vieira Lima

Suplentes

Cecília Maria Bacelar Sardenberg
João Augusto de Lima Rocha
Leda Maria Muhana Iannitelli
Maria Vidal de Negreiros Camargo
Naomar Monteiro de Almeida Filho
Nelson Fernandes de Oliveira

Organizador
José Fernando M. Rocha

ORIGENS E EVOLUÇÃO DAS IDÉIAS DA FÍSICA

Mecânica

Roberto I. Leon Ponczek

Termodinâmica

Suani T. Rubim de Pinho

Mecânica Estatística

Roberto F. Silva Andrade

Eletromagnetismo e Ótica

José Fernando M. Rocha

Teoria da Relatividade

Olival Freire Júnior

Física Quântica

Aurino Ribeiro Filho

EDUFBA
Salvador - 2002

números muito grandes, como potências de 10, chegando perto da noção de logaritmo. Os números irracionais ou estúpidos, como eram chamados, inicialmente, aqueles que não podem ser representados como razão de números inteiros, (cuja descoberta, por Pitágoras, desencadeou a primeira revolução científica da Antigüidade) não pareciam preocupar muito os chineses, pois que não possuíam o ideal de perfeição da natureza e nem a idolatria aos números inteiros.

Na Física, a grande contribuição chinesa foi o conceito de ondas que se propagam no espaço. A Mecânica chinesa nunca se preocupou com átomos ou modelos atômicos, pois isso violava sua crença de que o todo não podia ser descrito por partes menores. Em contrapartida, criaram um modelo ondulatório do universo. Desde tempos muito antigos, os chineses usavam uma teoria ondulatória para descrever o movimento e as transformações da matéria. O princípio *Yang* crescia, enquanto que *Yin* decrescia, ou vice-versa, devido a uma propagação ondulatória. Sem dúvida alguma, esta visão se aproxima muito da Mecânica Quântica Ondulatória.

O modelo cosmológico chinês mais interessante data, aproximadamente, do primeiro século d.C., consistindo num universo infinito e vazio, onde os corpos celestes se moviam sob a ação de "ventos". Pode parecer ingênuo, mas esse universo infinito e vazio, com corpos flutuando no espaço, sob a ação de forças é, sem dúvida, mais avançado e menos restritivo que o único conceito distinto da época, que se baseava na rígida crença

grega das esferas sólidas, concêntricas e encaixadas mecanicamente.

A Mecânica clássica newtoniana pouco se deixou influenciar pelas idéias chinesas. Newton e Descartes eram pensadores basicamente ocidentais. Newton acreditava no monoteísmo bíblico-mosaico, no qual um Deus, hierarquicamente superior, é o Criador de um universo organizado e regido por leis matemáticas exatas. O pensamento chinês só se tornou relevante neste século, com o advento das teorias indeterministas, probabilísticas e dualistas da matéria.

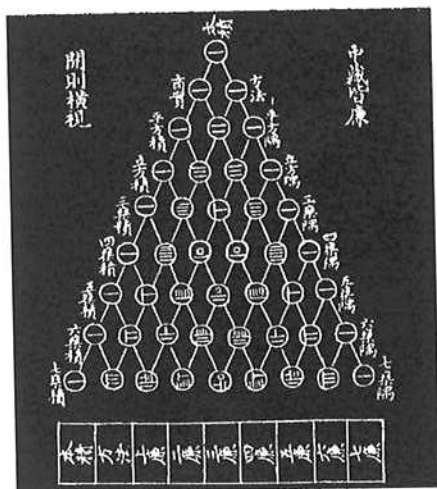


Fig. 3 - O triângulo de Pascal dos chineses.

5. A Ciência e a Filosofia Gregas

No período que vai, aproximadamente, do século VI a.C. até o começo da era cristã, o mundo assistiu, na Grécia Antiga, a uma das mais impressionantes manifestações culturais vistas na história do saber humano. Já a partir do século IX a.C., a antiga mitologia dos poetas Hesíodo e Homero, em que pontificavam centenas de deuses caprichosos e ciumentos, começa a ser substituída por uma visão filosófica que pode ser considerada a precursora da ciência como hoje a entendemos. A cultura grega expandiu-se numa área, que hoje vai da costa da Itália ao Oriente Médio, passando pela Macedônia (sul da Iugoslávia) e atravessando o Mediterrâneo até o norte do Egito (Alexandria). Alexandre, o Grande, seu maior imperador e discípulo de Aristóteles, chegou a conquistar a Babilônia e quase todo o Oriente Médio, levando a cultura helenística às mais longínquas fronteiras. A Filosofia, a Matemática, a Astronomia, a Poesia, o Teatro, a Política, a Oratória, os esportes, enfim, todas as áreas do pensamento e da criatividade humanas, chegaram, com os gregos, ao seu ponto culminante. Essa efervescente criatividade só terá paralelo na história do ocidente, cerca de 15 séculos depois, no período, por este motivo, chamado de Renascimento.

São centenas de inteligências luminares, meditando sobre os mais variados campos como, ainda, a Arquitetura, a Escultura, a Harmônica (atual Acústica), Medicina, Mecânica e Literatura.

Não se tem, até hoje, uma explicação muito precisa para esse magnífico fenômeno cultural ter brotado e se desenvolvido justamente na Grécia e, justamente, naquela época. A mais comum das explicações é de ordem geográfica. A Grécia daqueles tempos era o centro do mundo civilizado, pois ficava equidistante do Oriente, do Egito e da Europa Ocidental, sendo seus portos, assim, escalas obrigatórias das rotas de navegação que se organizavam no Oriente e das que voltavam do ocidente. Numa época em que a informação só poderia vir de navios ou a cavalo, este não deixa de ser um importante fator. Por outro lado, os sábios gregos, devido à facilidade de locomoção, iam comumente ao Oriente em busca de conhecimentos. Por volta dessa época, a Babilônia era a toda poderosa capital da Mesopotâmia e do Oriente Médio e, seguramente, muitos conhecimentos científicos foram "trazidos" pelos gregos, nessas freqüentes viagens (Fig. 4).

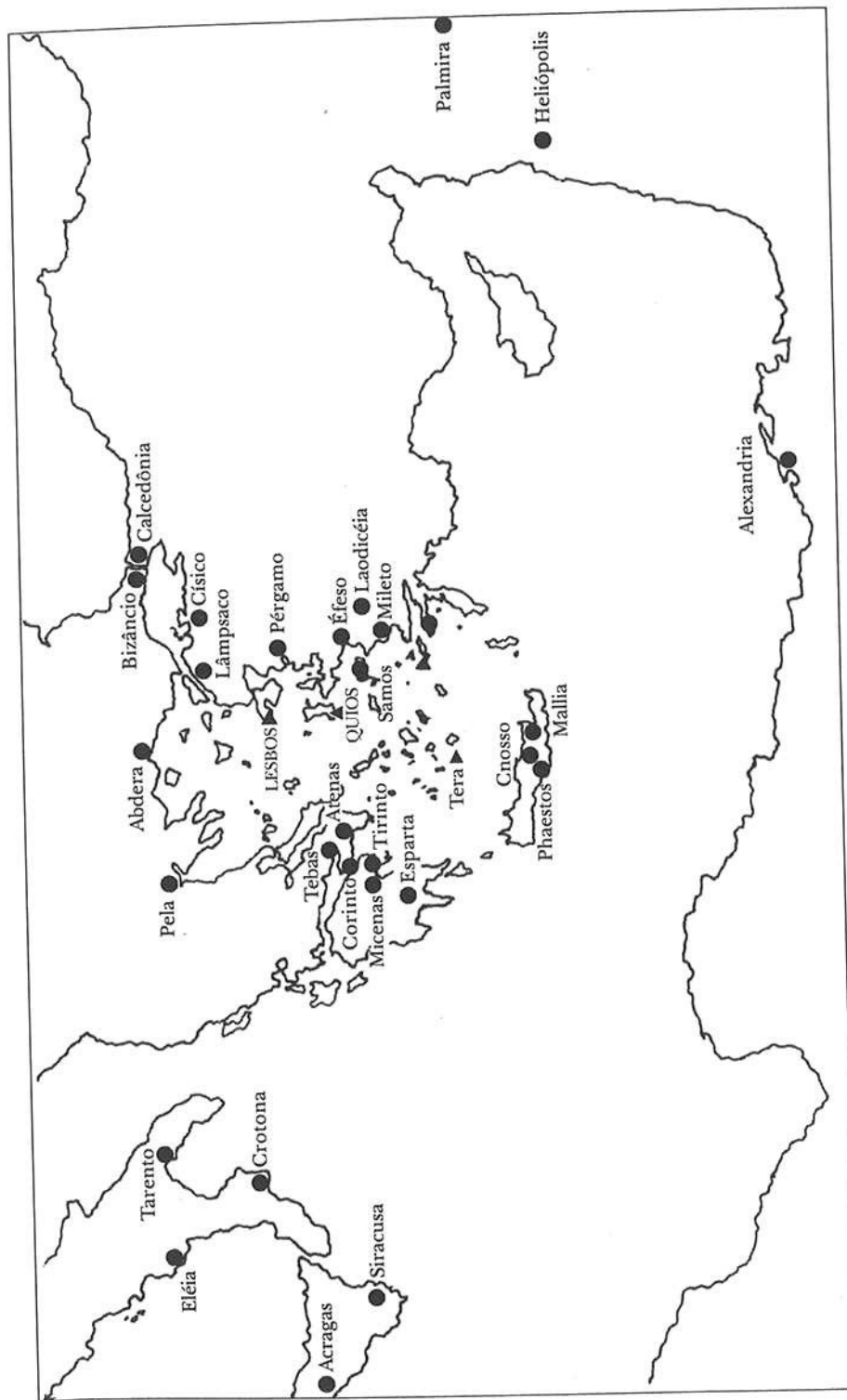


Fig. 4 - A Grécia no tempo de Alexandre.

Vimos que, nessa época, também na China, se desenvolveram importantes escolas filosóficas como o taoísmo e o pensamento yin-yang, mas isso, provavelmente, foi uma simples coincidência, já que os gregos não poderiam ter-se deslocado para a tão longínqua e inacessível China, não havendo, portanto, chances para trocas de informações.

Acreditamos não ser exagero dizer que, até os dias de hoje, nossa civilização está profundamente impregnada pelo pensamento e pela cultura gregos. Não teríamos também receio em afirmar que, nos seus primórdios, a civilização ocidental foi o produto de uma grande síntese entre o conhecimento grego e a teologia monoteísta judaico-cristã.

Como o pensamento grego abordou todas as áreas do conhecimento humano, apresentaremos aqui, de forma sucinta, tão-somente as idéias dos pensadores mais diretamente envolvidos com a Geometria, a Astronomia e os primórdios da Mecânica e estrutura da matéria.

5.1. Pitágoras e a Harmonia Musical do Universo

Pitágoras sobe, juntamente com Platão e Aristóteles, ao pódio máximo do pensamento helênico. Nasceu por volta do século VI a.C., criando, na costa sudeste da Itália, a famosa comunidade dos pitagóricos que, juntamente com os ideais de saber, cultuavam uma vida ascética e desprovida dos prazeres materiais. Pitágoras foi matemático, astrônomo, filósofo e líder religioso, empreendendo viagens ao Egito e à Babilônia onde, possivelmente, aprendeu tanto sobre Geometria e Aritmética que, posteriormente, algumas criações lhe foram atribuídas, como o famoso teorema dos triângulos retângulos, que leva o seu nome.

Uma das suas mais importantes contribuições foi a de ter descoberto o princípio de vibração dos corpos. Notou haver uma relação matemática entre as notas das escalas musicais gregas e os comprimentos de uma corda vibrante ou de uma coluna de ar, como numa lira ou numa flauta. Assim, uma corda vibrante de determinado comprimento vibra, em sua forma mais simples, produzindo uma nota. Reduzido este comprimento à metade (como se faz, por exemplo, no violão, pressionando o seu braço) a cor-

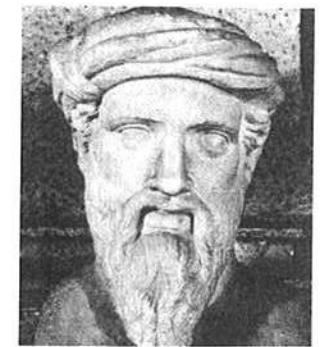


Fig. 5 - Pitágoras.

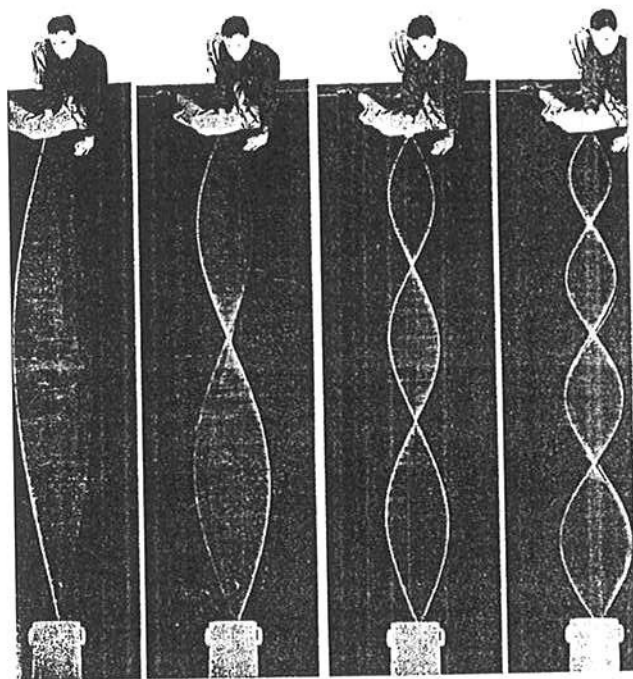


Fig. 6 - O princípio dos corpos vibrantes.

A vibração dos corpos obedece assim a um estético princípio de números inteiros ou de suas relações. Cada intervalo musical - razão das freqüências entre duas notas - na escala natural é descrito por uma razão de pequenos números: 1/1 representando o uníssono; 2/1, a oitava, (de um dó a outro imediatamente mais agudo); 3/2, a quinta (dó - sol); 4/3 a quarta (dó - fá); 5/4 a terça maior (dó - mi).

Verificou também Pitágoras que, quanto menores os números da fração, mais agradável e perfeito é o intervalo musical, tornando-o mais próximo da idéia divina. Segundo ele, enquanto o uníssono 1/1 refletiria a unidade cósmica, o intervalo que vai de fá a si, chamado de trítone, que é um dos mais afastados da "Lei dos pequenos números", representaria o caos. De fato, fá e si, quando emitidos simultaneamente, produzem grande dissonância (mal-estar auditivo), sendo literalmente execrados em toda a Idade Média, considerados diabólicos e designados com o sugestivo nome de *diabulus in música*.

Pitágoras ficou tão entusiasmado com a lei dos pequenos números que chegou a acreditar que "todas as coisas do universo eram números inteiros", associando, assim, aos planetas e estrelas um mesmo prin-

da passa a emitir um som, uma oitava acima, isto é, com o dobro da freqüência. Se a corda for dividida em três partes iguais e a fizermos vibrar, obteremos o que em música se denomina de intervalo de quinta e, analogamente, uma divisão da corda em 4 partes iguais produzirá um intervalo de duas oitavas acima do som fundamental (Fig. 6).

cípio: os períodos planetários deveriam guardar entre si uma relação de pequenos números inteiros, e o cosmos todo executaria, assim, uma fantástica música universal - a música das esferas (Fig. 7). Para a comunidade dos pitagóricos, a música era assim o cântico sagrado entoado pelos números inteiros e suas justas proporções. Estava criado o primeiro modelo matemático para descrever o universo, que, embora sendo, esteticamente, uma das mais perfeitas construções da mente humana, não foi capaz de descrever o movimento dos planetas nos céus. Esses pareciam não querer seguir os caminhos da perfeição e da beleza e nem produzir a música celestial. Preferiam, na verdade, obedecer a leis mais complexas que Kepler descobriria dois milênios depois! (vide 7).

Pitágoras estendeu o seu modelo musical à geometria. Como uma corda dividida em 12 unidades vibra de forma mais harmoniosa quando dividida em 8 e 6 unidades (respectivamente 2/3 e 1/2 de 12), ele considerou que os números 12, 8 e 6 estavam "em progressão harmônica", associando ao cubo que possui 12 arestas, 8 vértices e 6 faces, a condição de uma figura geometricamente harmônica. Ele teria aprendido no Egito a regra 3, 4 e 5 referente aos lados de um especial triângulo, o que corrobora, mais uma vez, a sua lei de números inteiros. Mas quando ele conhece aquilo que chamamos de teorema de Pitágoras, a sua teoria sofre um forte abalo: de fato, as diagonais das faces do cubo não guardam, com seus lados, uma relação de números inteiros assim como o perímetro de um círculo com o seu diâmetro. Os pitagóricos ficaram profundamente assustados com esse fato, pois isto, em princípio, abalava a crença de que a Geometria e a Música descreveriam "todas as coisas". A descoberta de que existem grandezas que não podem ser expressas por frações de números inteiros, isto é, a existência dos números irracionais (que foram denominados inicialmente de estúpidos) constituiu-se numa das mais radicais revoluções científicas da Antigüidade. Conta-se que um dos discípulos de Pitágoras teria descoberto a (2 antes mesmo do mestre que, ao tomar conhecimento da descoberta, ficou profundamente chocado, uma vez que o estranho número violava de forma radical toda a numerologia de números inteiros. Pitágoras ordenou que o discípulo se calasse e que mantivesse em segredo a sua descoberta este, no entanto, não obedeceu, sendo severamente punido (chega-se mesmo a suspeitar que o genial, porém, indiscreto discípulo tenha sido condenado à morte!).

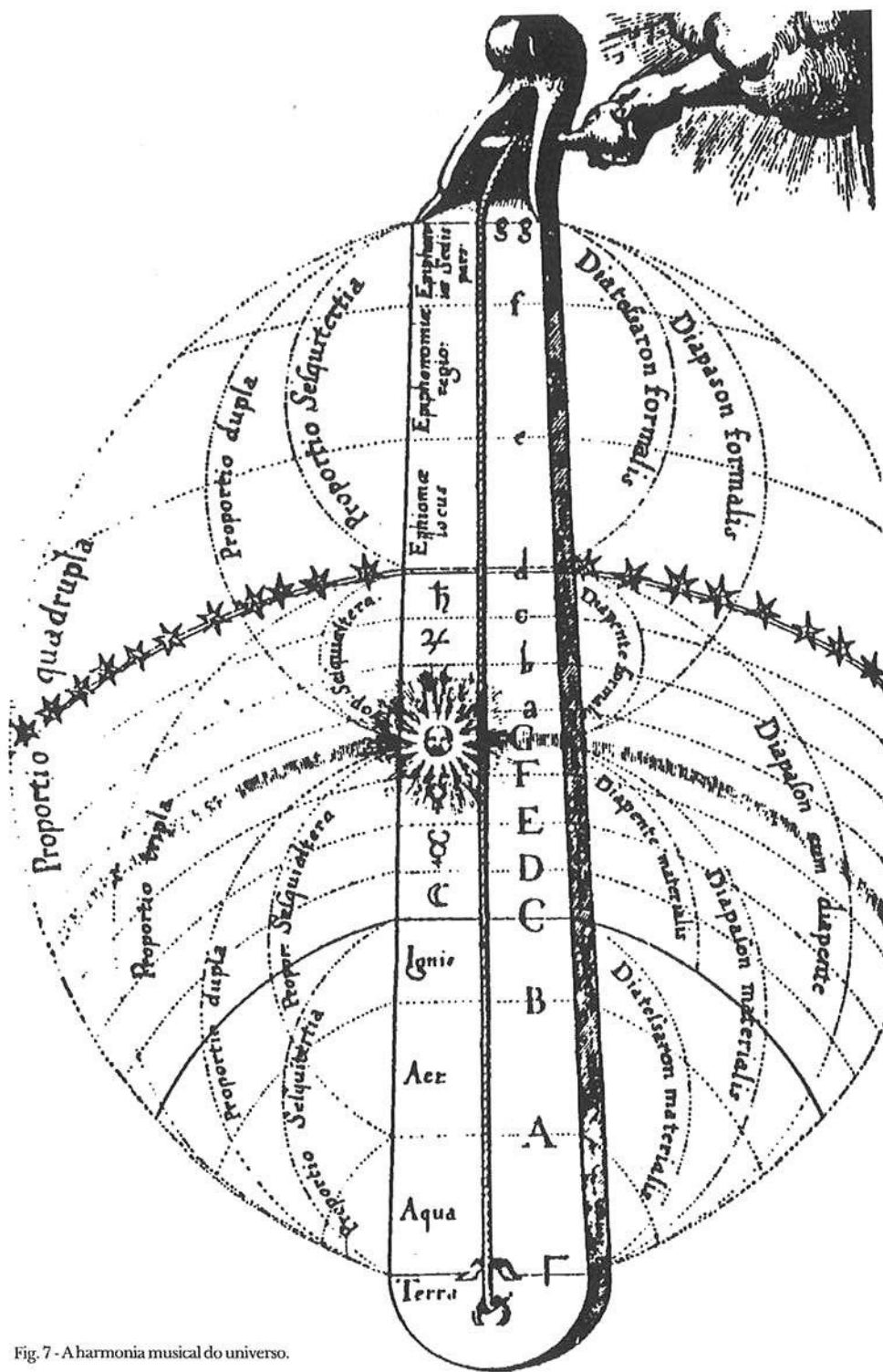


Fig. 7 - A harmonia musical do universo.

O amor dos pitagóricos pela simetria e pelos números os conduziu a importantes teorias em relação ao universo, como a de que planetas e estrelas deveriam girar regularmente ao redor da Terra, obedecendo à mais simétrica das curvas: o círculo. Por outro lado, o céu e a Terra deveriam ser esféricos. Essas idéias tiveram profundos efeitos sobre toda a Física, Mecânica e Astronomia, até o Renascimento.

5.2. Parmênides, Zenon e Heráclito

Para Parmênides, natural da Eléia, hoje costa da Itália, o movimento, a evolução ou a mutação de qualquer coisa ou objeto é o não ser. O Ser preenche todo o espaço e então o universo é único, ilimitado e permanente, além disso, o Ser é imutável, eterno e imóvel. Mudança, transitoriedade, movimento e o vácuo são o Não-Ser, e portanto, irreais e ilusórios.

Essa idéia, que hoje pode nos parecer bem estranha era, na verdade, muito difundida entre os gregos, que viam na perfeição a razão de ser última das coisas, porque o que é perfeito não precisa mais mudar, pois já atingiu a perfeição. Assim, cubos, esferas, sólidos regulares, números inteiros são imutáveis e assim perfeitos, ou reciprocamente, perfeitos e assim imutáveis.

Zenon, discípulo de Parmênides, chegou a formular alguns paradoxos para "provar" a idéia da imobilidade das coisas. O mais conhecido deles é o da corrida de Aquiles contra a tartaruga, que com uma pequena variante transformou-se na famosa fábula da lebre e da tartaruga: Aquiles é 10 vezes mais rápido do que a tartaruga e, portanto, a desafia dando-lhe uma vantagem que lhe permite partir a uma distância d à sua frente. Quando Aquiles percorre esta distância, ocupando a posição inicial da tartaruga, esta terá se movido de $d/10$, estando assim à sua frente. Quando Aquiles cobre novamente esta distância, a tartaruga terá se deslocado de $d/100$ e, assim sucessivamente, concluindo-se que a tartaruga está sempre à frente de Aquiles, "provando-se" que o importante é a posição inicial dos objetos e não seus movimentos subsequentes.

A explicação para este paradoxo vem do fato de que a soma dos tempos necessários para Aquiles cobrir as diferenças de posições forma uma série convergente do tipo: $d/v + d/10v + d/(10)10v + \dots = d/v(1 + 0.1 + 0.01 \dots) = 10d/9v$, onde v é a velocidade de Aquiles, que ultrapassa

sará a tartaruga após este tempo finito. Os gregos, obviamente, ainda não conheciam o critério de convergência de séries infinitas, que só foi descoberto por Cauchy em tempos relativamente recentes, sendo assim o paradoxo bastante convincente para a época.

Um outro argumento em favor de Parmênides, e de sua descrença no movimento, pode ser dado se olharmos criticamente para a mais elementar das fórmulas da cinemática que se ensina nas salas de aula do segundo grau: a velocidade no movimento retilíneo uniforme se escreve: $v = (x_2 - x_1) / (t_2 - t_1)$, nos quais x_2 e t_2 são a posição e o tempo no presente e x_1 e t_1 são a posição e o tempo num passado muito próximo, mas que ficou registrado apenas em nossa memória, pois não estamos mais vendo o corpo no passado. A fórmula então compara uma realidade presente como uma ilusão passada, algo como uma foto, impressa em nossa consciência. Não estará assim o velho Parmênides certo ao dizer que a velocidade, e portanto o movimento, é apenas um “truque” de nossa percepção ou algo criado pela consciência?

Heráclito, natural de Éfeso, defendia um ponto de vista diametralmente oposto ao de Parmênides, isto é, o Ser em constante e eterno movimento, o que significa que todas as coisas não param de mudar, evoluir e de se mover em um eterno devir. Assim, ao contemplarmos um rio de águas correntes, segundo Heráclito, jamais veremos a mesma coisa, pois que todo o rio estará em constante renovação. Esta idéia, que para a maioria das pessoas de hoje parece ser mais aceitável que a de Parmênides, foi, provavelmente, intuída por Heráclito sob influência direta ou indireta de filosofias orientais da Babilônia, ou até da Índia, pois que este pensamento é mais oriental do que grego propriamente dito.

5.3. Thales, Anaximandro, Anaximenes e Empédocles

Thales, Anaximandro e Anaximenes são três dos filósofos conhecidos como pré-socráticos que advogavam o princípio do *arché*, isto é, uma espécie de “argila” primordial dos quais são feitos todos os elementos que constituem o universo. Os três são naturais da mesma cidade de Mileto e do mesmo século VI a.C. O *arché* embora podendo assumir várias formas se conservaria em sua totalidade, tendo assim uma grande importância teórica para a ciência e, em particular, para a Física, uma

vez que seria uma idéia embrionária para todos os princípios de conservação da natureza.

Thales acreditava que o *arché*, seria a água, provavelmente porque se trata de um “elemento” indispensável para a vida dos vegetais e animais. Para Anaximenes, no entanto, o *arché* seria o ar pois a respiração, ou *pneuma*, para os gregos, é o princípio fundamental da vida. O ar rarefeito se converteria em fogo e o ar denso seria uma nuvem que depois se transformaria em água e esta, por sua vez, em terra. Para Anaximenes, até os deuses seriam feitos de ar e a Terra seria um disco fino que flutua no ar.

Anaximandro advogaria um elemento básico ainda mais abstrato e primordial que o ar e a água. Seu *arché* era o *apeyron* (indefinido, infinito, ilimitado, em grego). Para ele, o universo seria uma “praia” de *apeyron* na qual se cavarmos um buraco surgirá um monte, sendo ambos constituídos pela escassez ou excesso do *apeyron*. A origem do universo ocorreria quando o *apeyron* quente se desprendesse do frio. O primeiro se converteria em fogo que constituiria, por sua vez, as estrelas e o Sol, e o segundo se converteria em terra e água no centro. Em seguida, o calor do Sol secaria a terra e os vapores produziram ventos que moveriam os astros. A Terra seria um cilindro cujo diâmetro teria três vezes a sua altura e permaneceria estável no centro. Este modelo físico e cosmológico, embora possa hoje nos parecer primário, constituiu-se num grande avanço científico em relação aos mitos de criação da época.

Empédocles, nascido por volta de 490 a.C., em Acrigento, atual Sicília, foi um dos formuladores da doutrina dos quatro elementos. Parece ter modificado os pontos de vista extremados de Parmênides, criando a idéia de quatro substâncias ou elementos imutáveis, os quais chamava de “raízes de todas as coisas” e que se combinavam sob a ação de duas forças básicas. Os elementos eram a terra, o ar, o fogo e a água e as duas forças eram por ele poeticamente chamadas de “amor” e “ódio”, isto é, atração e repulsão. Alguns historiadores chegam a supor que Newton se deixou influenciar pelas idéias deste pensador, especialmente quando descobriu que tanto maçãs quanto planetas eram atraídos por uma única força de atração universal. Empédocles chegou ainda a intuir que a luz leva tempo para viajar pelo espaço e que os objetos são vistos porque emitem algo, ao contrário do que pensavam os pitagóricos, que eram os olhos que emitiam algo em direção ao objeto.

5.4. Os Atomistas: Leucipo e Demócrito

Como conciliar a imutabilidade absoluta de Parmênides com a permanente mutação de Heráclito? Como imaginar um universo-Ser vindo do nada ou do não-Ser? Uma engenhosa solução de compromisso entre as duas escolas de pensamento é o atomismo de Leucipo e Demócrito. São contemporâneos (Leucipo é um pouco mais velho), nascendo por volta dos anos 500 a.C. e lecionando em Abdera, na costa norte do Egeu. O atomismo foi depois aprimorado por Epicuro de Samos (340-270 a.C.) e Lucrécio (98-55 a.C.).

A base do atomismo é que existem apenas duas coisas: átomos e o vácuo. O mundo é, assim, composto de matéria imersa num vazio total. Com esta concepção, pode-se imaginar uma realidade dinâmica - e portanto mutável - composta de pequenas partes imutáveis e indivisíveis que se combinam *ad infinitum*. Estas pequeníssimas porções imutáveis de matéria são os átomos (que significa indivisível em grego) que se movem e se combinam no vácuo, podendo-se construir uma

multiplicidade de sistemas maiores que podem, por sua vez, se mover, transformar e evoluir através de recombinações atômicas. As substâncias diferem entre si porque seus átomos diferem, tanto na forma, no número como na maneira como são arranjados. Os maiores se encaixariam entre si expelindo os menores, formando-se assim a terra, a água etc. Era uma teoria nova e materialista. Para Demócrito, tudo estava predefinido como um jogo de causas e efeitos entre os átomos (Fig. 8).

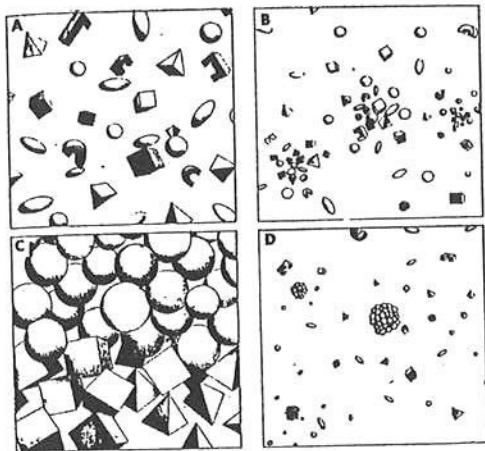


Fig. 8 - A combinação dos átomos e a formação do universo segundo os atomistas.

Podemos resumir algumas das principais idéias atomistas:

“Nada surge do nada”.

“Nada some ou se aniquila”.

“Existe o vácuo, pois no pleno como poderia a matéria se mover”?

“Os átomos são eternos e indivisíveis”.

“O universo é infinito e pleno de átomos”.

“Não importa em que região se esteja, o universo se mantém igualmente infinito”.

“O que é infinito não pode ter centro”.

“Existem vários mundos e Terras”.

Tudo se dá por acaso sem a intervenção de deuses”.

“Não há deuses nem alma imortal, apenas aglomerados de átomos”.

“As coisas são produzidas de forma natural e não sobrenatural”.

“É necessário erradicar os mitos, pois estes geram o temor do castigo divino”.

“Quem compreender o atomismo ficará tranquilo e sem medo, pois tudo ocorre pela reunião ou separação de átomos”.

O atomismo é um sistema de pensamento extremamente avançado para a sua época e possui, a nosso ver, grandes virtudes, sendo uma delas a de eliminar do pensamento antigo o medo e a superstição provocados pela intervenção de deuses vingativos e ciumentos, permitindo ao universo uma evolução livre feita de acordo com a dança combinatória dos átomos. Além disso, o atomismo sustenta até hoje a base do pensamento científico ocidental, qual seja, a de dividir um sistema complexo e mutante em partes indivisíveis e, portanto, sem estrutura interna. É a técnica de “dividir por partes para entender o todo”. Essa concepção científico-filosófica constituiu-se numa das grandes sínteses do pensamento ocidental, que persiste na ciência moderna, e que se harmoniza perfeitamente com a cosmovisão cartesiana-newtoniana na qual um Deus bíblico cria o universo a partir de matéria informe e desorganizada, provendo-o de leis mecânicas que regerão a sua evolução dentro de uma cadeia de causas e efeitos primários e secundários.

Nada é mais representativo do pensamento atomista do que este texto em forma de poema:

Aparentemente há cor.

Aparentemente há o doce,

Aparentemente o amargo,

Realmente há somente,

Átomos e o Vazio.