

**De Heisenberg
a Schrödinger**

**A HISTÓRIA DA
FÍSICA
QUÂNTICA**

Sten Odenwald



ALTA BOOKS
GRUPO EDITORIAL
Rio de Janeiro, 2024

SUMÁRIO

Introdução	6
Capítulo 1	O mundo Como o Vemos – 11
Capítulo 2	Os átomos e o Vácuo – 23
Capítulo 3	O mundo Quântico – 37
Capítulo 4	Coisas que Ondulam ou Não – 47
Capítulo 5	Ondas de Matéria – 57
Capítulo 6	Ondas Quânticas – 65
Capítulo 7	O princípio da incerteza de Heisenberg – 77
Capítulo 8	O átomo de hidrogênio Renascido – 87
Capítulo 9	Localidade e Realismo – 99
Capítulo 10	Relatividade e Antimatéria – 111
Capítulo 11	As partículas virtuais e o Vácuo – 123
Capítulo 12	Campos Quânticos – 133
Capítulo 13	O modelo-padrão e Muito Mais – 147
Capítulo 14	Engenharia Quântica – 163
Capítulo 15	Computação Quântica – 175
Capítulo 16	A natureza da Matéria – 185
Capítulo 17	O problema do Tempo – 195
Índice remissivo	204
Créditos das figuras	208



Este ícone na legenda de algumas imagens indica que você encontra a imagem colorida no material disponível para *download* na página do livro no *site* da Alta Books (altabooks.com.br).

O mundo COMO O VEMOS

O nosso mundo conhecido não é como parece. As montanhas, as cachoeiras e o chão sob nossos pés parecem bastante sólidos, mas na verdade são feitos de elementos ainda mais simples que não podemos ver sem ajuda da tecnologia. Boa parte da história humana se envolveu na exploração e no uso dessas diversas formas de matéria, desde as ferramentas de pedra à produção de bronze. Essas ideias rudimentares evoluíram sem parar durante milênios até obtermos compreensão pragmática da química nas mãos dos alquimistas medievais. Enquanto isso, esquemas rudimentares de classificação que serviram muito bem aos antigos deram lugar a outros mais complexos, conforme o número de formas elementares explodia. Cobre, prata, ouro e sal imploravam por um refinamento da categoria aristotélica das terras até o conceito mais apurado de matéria terrestre. Isso levou a várias tentativas de sistematizar um número crescente de substâncias em termos de propriedades básicas comuns, como densidade, reatividade química e cor, entre outras.

Os microscópios foram usados durante séculos para estudar o mundo além dos limites da visão humana.



Nossa experiência compartilhada do mundo

Saia e dê uma olhada: o que você vê? Além dos ornamentos da tecnologia moderna, com seus prédios, fios elétricos e torres de celular, o pano de fundo de rochas, solo, água e ar é visto pelos seres humanos desde a aurora da espécie. Na verdade, esses mesmos elementos foram os ingredientes comuns da paisagem natural percebida, de um modo ou de outro, por todas as criaturas vivas da Terra em boa parte dos últimos 500 milhões de anos. Durante quase todo esse tempo, os organismos existentes viram esses elementos do mundo com olhos desinteressados e se orientaram da melhor maneira possível para a sobrevivência. Há cerca de 40 mil anos, no tempo dos ancestrais mais primitivos da aurora da espécie atual *Homo Sapiens Sapiens*, houve pouca curiosidade registrada pela razão de as pedras serem diferentes da água e pela natureza do ar e do fogo. Esses ingredientes do mundo eram simplesmente o que eram, com algumas variações dignas

de nota. Havia água potável, água salobra e água salgada. Havia pedras de cores e durezas diferentes. Às vezes, o ar invisível ficava em movimento nos dias de vento e assumia o fedor horrível da carne putrefata ou a bela fragrância das flores do campo. Assim, nossos antigos ancestrais conheciam muitas variedades de pedra, ar e água e, sem dúvida, davam nome às mais importantes para a sobrevivência imediata deles. Não havia nenhuma razão específica para ter mais curiosidade pelo conteúdo do mundo físico além de nomear os materiais que tivessem algum propósito utilitário. Entre as “pedras”, por exemplo, as mais importantes foram denominadas sílex, ouro, cobre, estanho, ferro e sal. Uma variedade de plantas recebeu nomes, como trigo e cevada, e ainda os animais domesticados ovelhas, cavalos e cabras, além dos predadores. Havia nomes diferentes para tempestades com relâmpagos e para tornados, e talvez até para os diversos tipos de nuvens no céu.

Em uma cascata do Parque Nacional de Yosemite há rochas, água e ar reunidos como parte da experiência humana normal da matéria no mundo.





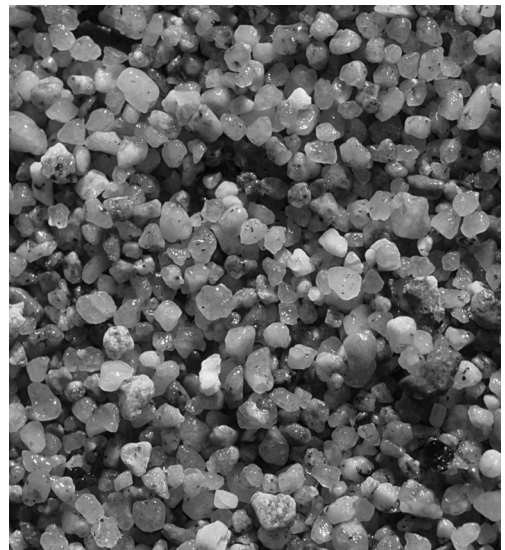
Além das pedras, do ar e da água, nossos ancestrais remotos podem ter notado dois outros ingredientes que se comportavam de forma muito diferente. Um deles era o fogo, que parecia ser produzido quando a fricção aquecia uma substância sólida até uma temperatura bastante alta, principalmente materiais orgânicos, como a madeira. O fogo é parecido com o ar por não ter densidade óbvia, e flui para cima, do chão para o céu, exatamente como o ar. O sol tem muito em comum com o fogo, pois produz luz e calor, ao contrário de todos os outros objetos do céu. Na verdade, os objetos do céu são claramente visíveis à noite, mas as estrelas, os planetas e a Lua não lembram pedras, ar, água nem fogo, e considerava-se que eram feitos de algum quinto ingrediente. Assim, com esses cinco ingredientes podemos classificar praticamente todas as coisas que vemos no mundo natural comum.

O mundo oculto um pouco além dos nossos sentidos

As maiores coisas que conseguimos ver no mundo são indubitavelmente dramáticas. Vistas espetaculares das montanhas, tempestades impressionantes com relâmpagos, tornados, cachoeiras e ondas oceânicas a poucos dias de caminhada de onde você estiver. Mas, ao que parece, na trama dessa grandeza é possível encontrar uma nova paisagem do pequeníssimo que é quase igualmente rica em novidades. Um passeio na praia ou na base de um penhasco nos põe em contato com partículas de areia que, em alguns casos, podem ser tão minúsculas que o olho se esforça para focalizá-las. Não há dois grãos de areia com exatamente o mesmo formato ou cor. A variedade enlouquecedora de formas rochosas que vemos hoje entre as montanhas

tem igual ressonância na escala dos grãos de areia.

Em alguns lugares do mundo, esses grãos de areia se empilham e formam dunas que lembram as montanhas mais distantes que barram nosso movimento. A confabulação visual entre a rocha sólida das montanhas e as formas delicadas das dunas de areia nos convida a imaginar que a estrutura subjacente das montanhas não passa de uma forma mais sólida das dunas de areia. Mais tarde, não nos desapontamos ao descobrir que as rochas sólidas realmente podem ser moídas pela fricção e transformadas em grãos de partículas como a areia. Também descobrimos que a variação de cor dos grãos de areia é um reflexo (bem literal!) dos diversos minerais que podem ser coletados na encosta da montanha. Mas as rochas não são o único ingrediente a ser pulverizado em outra forma granular. O ar carregado de vapor-d'água invisível pode se transformar em granizo e gotículas de água visíveis, enquanto a própria água pode se dissolver



Grãos de areia ao microscópio.



num borrifo de partículas que chegam ao limite da visão humana. Parece que todas as formas macroscópicas que observamos tão facilmente na natureza, as pedras, o ar e a água, podem ser dissolvidas em partículas cada vez menores. Mas por que parar aí? O que limita a visão humana e nos impede de vivenciar um mundo ainda menor, abaixo do tamanho dos grãos de areia?

Não é por acaso que podemos ou não ver coisas pequenas. O olho humano é uma lente cuja ampliação é organicamente limitada. Para ver paisagens grandes e distantes, seu formato é de uma lente biconvexa bem fina. Mas, para ver de perto, os músculos ciliares do olho puxam as bordas dessa lente para torná-la mais gorda no meio, assim podemos focalizar à vontade os objetos próximos. Os limites da visão humana estabelecidos por essa lente são tais que objetos com 0,04 mm de largura (o diâmetro de um fio de cabelo humano) são perceptíveis para olhos bons, mas objetos

com 0,02 mm não são. O ponto no final desta frase está perto do limite do que o olho humano consegue discernir. Você notará que, se ficar olhando o ponto, seu formato parece mudar de maneira quase imperceptível. Isso acontece porque as células ou cones e bastonetes da retina têm um tamanho finito, como os quadrados do tabuleiro de xadrez. A imagem do objeto é tão pequena que, quando a lente a focaliza na retina, a imagem só cobre alguns cones e bastonetes. A borda externa do ponto não fica mais lisa e varia de maneira irregular quando o movimento do olho leva a imagem dele pelo tabuleiro de xadrez dos cones e bastonetes da retina. Mas o formato de uma pequena semente sobre o pãozinho, que tem pouco menos de 1 mm, parece bem formado, porque a imagem da semente cobre várias dezenas de cones e bastonetes da retina e nos dá a percepção de um formato redondo e estável. Do mesmo modo, se você espalhar grãos de sal sobre um pedaço de papel preto, conseguirá identificar suas formas numa escala de cerca de 0,3 mm. Mas se fizer a mesma experiência com areia de praia bem fina, na escala de 0,02 mm, visualmente perceberá que os grãos existem, mas seu formato ficará indistinto e vai variar se você tentar fitar diretamente um único grão.

MOSCAS VOLANTES

Outra maneira de vivenciar o mundo pequeníssimo sem ajuda de tecnologia é pelo fenômeno visual das “moscas volantes”. Glóbulos vermelhos do sangue, em consequência de hemorragias, ou glóbulos brancos resultantes de inflamações são tipos comuns de material celular preso dentro do humor vítreo transparente do olho. Como a maior delas mede cerca de 20 micrômetros (0,02 mm) de diâmetro, essas células fazem sombra na luz que chega à retina, e as sombras são sentidas como pontos flutuantes grandes e incômodos no campo visual.

O mundo pelo microscópio

Os inventores continuaram a experimentar lentes de ampliação modesta, de 3 a 10 vezes, e finalmente desenvolveram os primeiros microscópios. Quando a curvatura fica mais extrema, a lente consegue ampliar mais. Uma grande esfera de vidro tem curvatura bastante suave na superfície, mas em esferas bem pequenas as curvaturas podem ser bem extremas. O cientista holandês Antonie



O ESTUDO DO PEQUENO

Os primeiros investigadores da natureza entendiam que havia um mundo de granulação mais fina, mas percebiam que muitos detalhes estavam ocultos bem abaixo do limite da acuidade visual humana. Uma das ferramentas mais antigas para contornar o problema, talvez desenvolvida por acidente, foi a Lente de Ninrode, de 750 a.C., desenvolvida pelos assírios. Era uma lente rudimentar de vidro que ampliava o tamanho cerca de três vezes. Se era realmente usada para estudar detalhes pequenos não se sabe, porque também parecia vidro decorativo usado com outros propósitos. Em geral, acredita-se aos antigos gregos e romanos terem enchido esferas de vidro com água para servirem de ampliadores rudimentares. No século 1 d.C., Sêneca, o Jovem, observou que “as letras, por menores e mais indistintas que sejam, são vistas maiores e com mais clareza através de um globo ou vidro cheio d’água”. Houve muitas discussões durante a Idade Média sobre como a luz seria refletida e refratada, mas só no século XI as lupas foram inventadas e usadas sistematicamente pelos monges para iluminar seus manuscritos. Eram esferas de vidro cortadas ao meio que formavam lentes com capacidade modesta de ampliação. Então, em 1286, foram inventados os primeiros óculos com lentes de vidro, polidas até chegar à forma correta.

Van Leeuwenhoek (1632-1723) usou esse princípio da curvatura para fabricar esferas minúsculas de vidro muito bem polido montadas numa armação para criar visualizadores simples com ampliação de 250 vezes ou mais. A invenção de sistemas de lentes de alta ampliação criou um mundo drasticamente novo que se tornou a nova ciência da microscopia. Praticamente tudo, de pulgas a areia, foi examinado e desenhado de forma artística. Com a ampliação, as células vermelhas do sangue puderam ser estudadas, assim como o vasto exército de “animálculos” microscópicos descobertos na gota-d’água de um laguiinho pelo próprio Leeuwenhoek. Antes do advento da fotografia, os microscopistas tinham de ser artistas especializados, capazes de desenhar os mínimos detalhes na proporção correta enquanto, à luz de

velas, se curvavam durante horas sobre o microscópio.

Os desenhos de Walther Flemming no seu estudo sistemático das células, de 1880, acabaram revelando a sequência de passos da divisão e da reprodução celulares. Os desenhos em si eram uma forma de arte e revelavam detalhes de até 0,01 mm. Com ampliações acima de 1.000 vezes, que era o limite do projeto do microscópio óptico, o mundo explodiu num nível de belas estruturas dentro das próprias células. As fibras de cromatina quase imperceptíveis de Flemming, essenciais na divisão celular e que pastoreavam os cromossomos durante a mitose, tinham apenas 10 microns (0,01 mm) de comprimento, mas 0,010 micron (0,00001 mm) de diâmetro. Um único cabelo humano (75 microns ou μm), mal visíveis a olho nu, seria 7.500 vezes maior. Além de serem sistemas biológicos



ANTONIE VAN LEEUWENHOEK

Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723) nasceu em Delft, na República Holandesa. Seu pai era cesteiro e morreu quando o menino tinha apenas 5 anos; mais tarde, a mãe, que era rica, casou-se de novo, mas o padrasto morreu quando o garoto estava com 10 anos. Antonie foi morar com o tio, advogado em Benthuisen, e, com 16 anos, tornou-se aprendiz de guarda-livros de um mercador de tecidos de Amsterdã.

Esse não é o padrão seguido por muitos contribuidores da ciência, mas, mesmo assim, Antonie se tornou o pai da microscopia por uma consideração muito prática: ele queria inspecionar a qualidade dos fios usados nos tecidos. Assim, aprendeu a fazer microscópios seguindo instruções obtidas em invenções anteriores da óptica da época. Em vez de polir as lentes, ele descobriu que derreter o vidro na chama criava esferas que produziam ampliação muito grande quando se olhava por elas. Essa descoberta lhe permitiu não só inspecionar os fios finos, mas deu acesso a todo o mundo da natureza microscópica que seus contemporâneos mais científicos só viam vagamente.

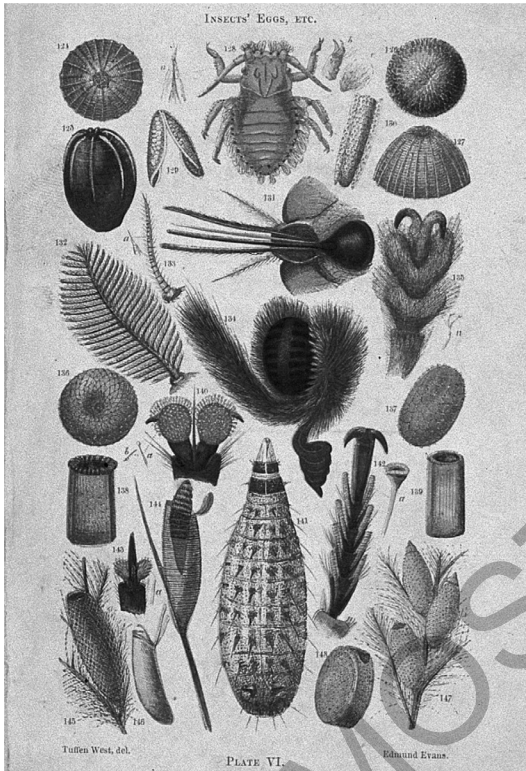
No decorrer das investigações, ele publicou nada menos que 190 cartas à Royal Society para anunciar suas muitas descobertas da vida microscópica. Foi eleito membro da Royal Society em 1680, honra que o pegou completamente de surpresa. Van Leeuwenhoek estava tão avançado no campo da microscopia que, segundo dizem, contemporâneos famosos, como Robert Hooke, afirmaram que o campo passara a descansar quase inteiramente sobre os ombros de um só homem. Durante sua vida, uma série de personagens mundiais famosos espiou por seus aparelhos, como Gottfried Leibniz, Guilherme III de Orange, sua esposa Maria II e o tsar Pedro, o Grande.



Antonie van Leeuwenhoek.

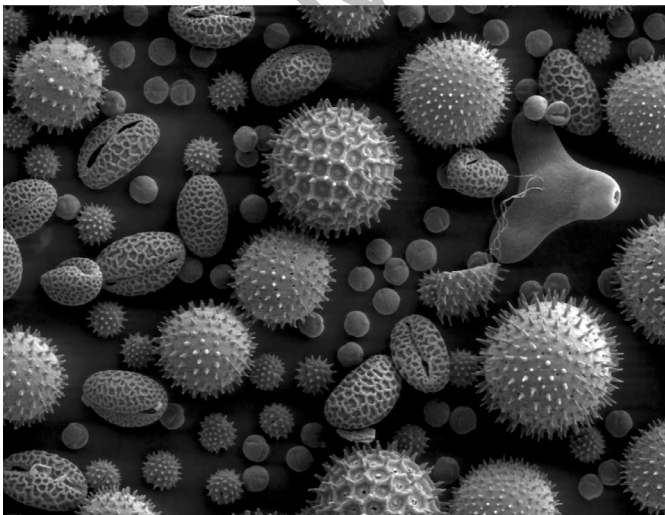


Esse desenho foi publicado em 1867 e mostra detalhes microscópicos de várias estruturas de seres vivos.



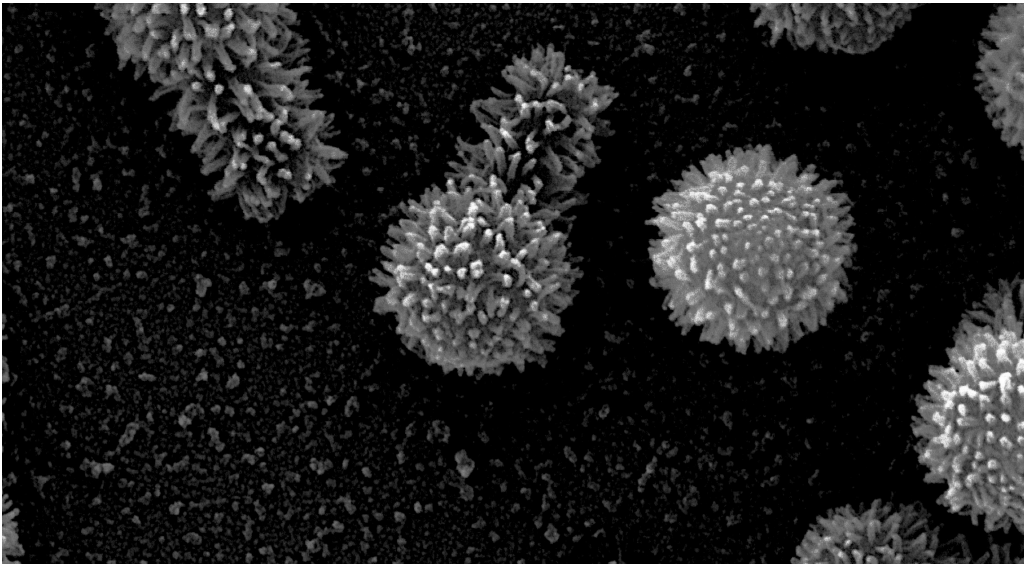
que provocaram intensa curiosidade nos microscopistas do século XIX, de repente toda uma série de cristais de rocha e grãos de areia e poeira se revelaram uma variedade atordoante de formas e composições.

Enquanto isso, depois de vários séculos de uso e refinamento, os microscópios ópticos começaram a mostrar suas limitações. A capacidade de discernir detalhes menores do que $0,01 \mu\text{m}^1$ era atrapalhada pelo comprimento de onda da luz usada para formar a imagem, mesmo com as melhores lentes. As tecnologias mais novas do século XX levaram a avanços na microscopia com a invenção do microscópio eletrônico (1931) e do microscópio de varredura por tunelamento (década de 1980). Pela primeira vez, a estrutura das menores formas de vida, os vírus, ficou visível com ampliações de 50.000 vezes, impossíveis de obter com a luz, mas

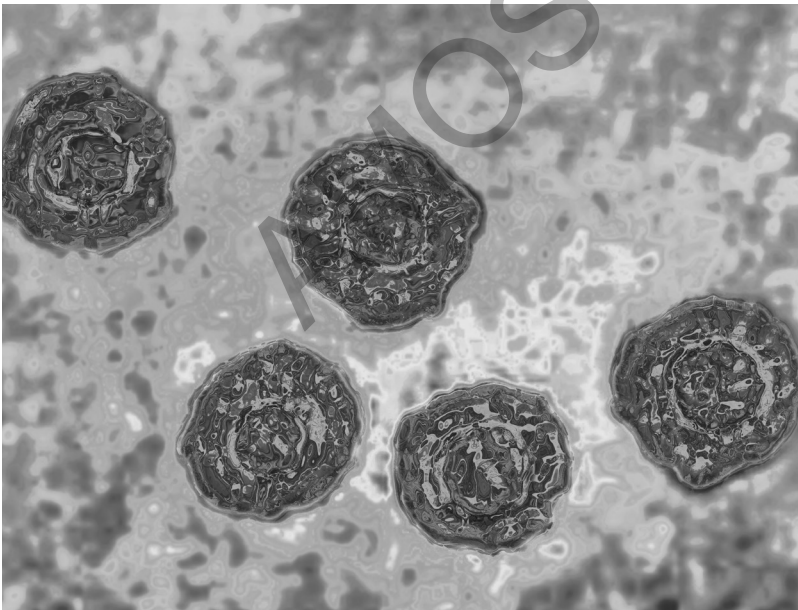


Pólen de uma variedade de plantas. A imagem está ampliada 500 vezes, então o grão em forma de feijão no canto inferior esquerdo tem cerca de 50 μm de comprimento.

1. A unidade de medida micron, cujo símbolo é μm , faz parte do Sistema Internacional de Unidades e é equivalente a dividir um milímetro por 1.000. O plural de micron é micras: Um fio de cabelo tem 75 micras.



Tupánvirus ampliado 50.000 vezes, com detalhes de até 0,1 μm (100 nm). **IC**



Vírus da hepatite C visto por um microscópio eletrônico de transmissão. O diâmetro real do vírus é de cerca de 22 nm. **IC**

rotineiras quando se usam elétrons como “balas” disparadas para formar a imagem. O micrón (0,001 mm) foi substituído pelo nanômetro (1 nm = 0,001 μm) como nova

unidade prática de medição. Com ampliação de 100.000 vezes, o aterrorizante vírus da poliomielite, que causou tanto sofrimento aos seres humanos, foi definido pela



primeira vez em 1953 como partículas redondas e enigmáticas com apenas 20 nm (0,00002 mm) de diâmetro.

Abaixo da escala de 1 micrón, as bactérias e vírus começaram a mostrar seus formatos detalhados. Entre as formas de vida mais numerosas da Terra, não parecia haver limites à sua variedade. A natureza ainda não tinha esgotado as formas inovadoras de embalar a matéria viva. Entre os objetos do mundo inorgânico dominados pelos cristais de rocha, encontramos um mundo muito mais empobrecido. Só há, no máximo, 32 maneiras diferentes de se formarem cristais no espaço tridimensional, são os grupos pontuais cristalográficos, que forçam as rochas a assumir apenas algumas formas microscópicas.

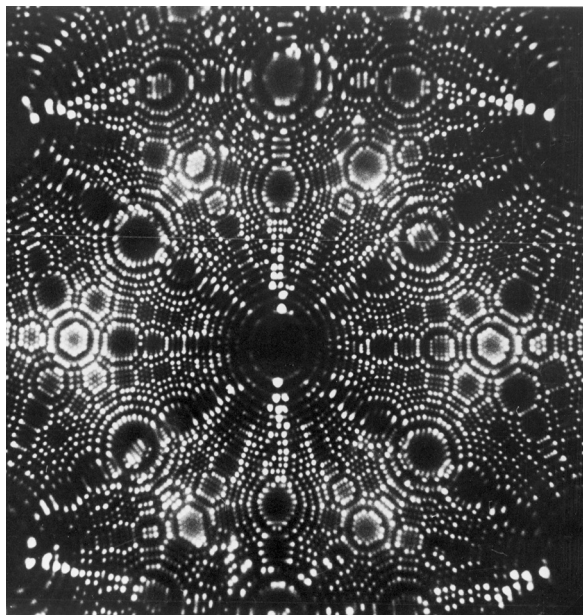


Um vislumbre do mundo atômico

Em 1 nanômetro, que é um bilionésimo de metro (1 nm = 0,000001 mm), até os microscópios eletrônicos começaram a atingir seu limite prático. Bem na hora, em 1951, foi inventada uma nova tecnologia, a microscopia iônica de campo, que abriu a porta da última escala das estruturas naturais. Ao contrário do esguio microscópio convencional, o iônico de campo mais parece uma coletânea aleatória de válvulas a vácuo, tubos de aço inoxidável e cabos elétricos, sem nenhuma “lente” óbvia. Mas no fundo do emaranhado dessa tecnologia, correntes elétricas e agulhas afiadas com pontas inimaginavelmente finas se combinam para criar cenas deslumbrantes um milhão de vezes menores do que a visão humana consegue enxergar. A visão de até 0,1 nm revelou um mundo povoado por bolas de matéria separadas e fixadas em treliças geométricas. Finalmente, a ciência e a tecnologia atingiram o limite da matéria, e

Imagem micrográfica eletrônica de varredura de cristais de quartzo comuns (a imagem original foi colorida artificialmente).

podemos observar corpos sólidos perderem literalmente a substância que conhecemos. Em certa escala, ao segurarmos uma folha de cobre na mão, ela parece bem normal. Na escala de 1 nm, ela se dissolve numa coletânea de pontos com precisão geométrica que não dá nenhuma pista da sua aparência normal na escala humana. O que também ficou visível foi que a variedade de formas que encontramos em cada estágio de ampliação começou a sumir. Entre as características e formatos aparentes em 1 nm ou menos, grande redução do número de formas isoladas começou a ocorrer. As coletâneas de pontos do tamanho de átomos produziam arranjos que, de certo modo, pareciam menos complexos. O estudo de amostras orgânicas e inorgânicas revelou as formas indistintas das moléculas e dos átomos que as constituíam, mas a forma geral



Fotografia histórica de átomos de uma agulha de tungstênio vistos por um microscópio iônico de campo.

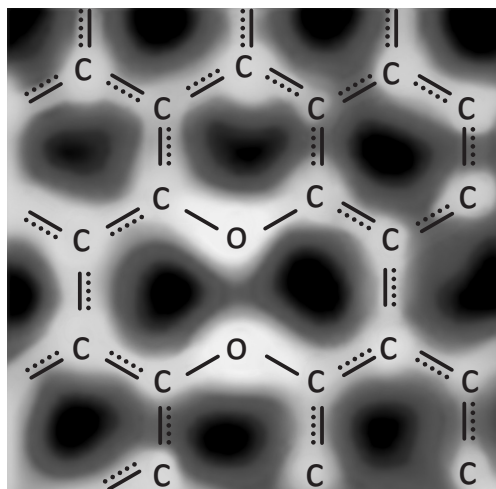
não era tão variada quanto o número estonteante de formas encontrado pelos primeiros microscopistas que estudaram os organismos na água dos lagos, como Leeuwenhoek.

A tecnologia de ver coisas pequenas não parou de evoluir depois do surgimento do microscópio iônico de campo em 1953. Algumas décadas depois, em 1981, foi inventada outra técnica, chamada microscópio de varredura por tunelamento. Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, seus inventores, trabalhavam no laboratório da IBM em Zurique e receberam o Prêmio Nobel de Física de 1986 pelo trabalho inovador. Agora, eram possíveis imagens ainda mais claras do que as do microscópio iônico de campo. A amostra estudada não precisava ser posta numa agulha

fina; em vez disso, um sensor semelhante a uma agulha passava pela amostra para construir uma imagem do que estava sob o átomo da ponta da agulha. Como o filho precoce que ganha um microscópio no Natal, engenheiros e cientistas puseram toda uma série de objetos sob a agulha do aparelho. A maioria eram amostras minerais estáveis, mas, finalmente, até o DNA humano ocupou o centro do palco e revelou, pela primeira vez, seu formato em espiral dupla.

A jornada do macrocosmo conhecido de montanhas e cachoeiras até o mundo submicroscópico dos átomos levou milênios para ser concluída, mas hoje vemos o mundo inteiro com muito mais clareza. Em sua base, estão objetos pequenos chamados átomos que, aparentemente, se ligam em várias combinações para criar toda a

Imagens de átomos de oxigênio numa rede de carbono, vistos por um microscópio de varredura por tunelamento. IC





estrutura do que está a nossa volta. Não são objetos teóricos, como foram por mais de dois mil anos, mas características reais e, com a ajuda de um pouco de tecnologia, observáveis no nosso mundo. Outra coisa que notamos é que o movimento parece suspenso. Nos microscópios ópticos, ainda conseguimos ver os organismos e as células se movendo, mas com certa dificuldade. Essa é uma característica da propriedade da matéria chamada viscosidade. Você sente alguns efeitos dela quando nada. As forças viscosas que agem contra o movimento são incômodas para seres humanos de dois metros de altura, mas ficam cada vez piores quando o tamanho do sistema diminui. A maioria dos sistemas vivos microscópicos parece suspensa no espaço, pois as forças viscosas os trancam numa prisão dinâmica que dificulta o movimento. Para eles, a água comum mais parece melado. Alguns animais, como o paramécio, que só mede 50 a 300 microns, têm cílios, organelas semelhantes a pelos, na superfície. Como os remos de um barco, os cílios movem o paramécio em

busca de comida. Mais de 40.000 espécies de organismos têm cílios para se deslocar. Mesmo assim, nessa escala não há nada no movimento ou na sua falta que indique algo novo no modo como a natureza move a matéria com autopropulsão, flutuação ou gravidade.

Apesar de decompor o mundo nas estruturas atômicas que parecem mais elementares, nas imagens, mesmo as de resolução mais alta oferecidas pelos microscópios iônicos de campo e pelos de varredura por tunelamento, há muito pouco que possamos obter sobre o funcionamento dos átomos. Apesar de toda a diversidade das estruturas maiores, nas imagens esses átomos são muito parecidos uns com os outros. Podemos discernir o formato impreciso de algumas moléculas grandes, mas, quanto aos átomos que as constituem, eles têm tamanho (0,1 nm) e formato (redondo) semelhantes. Não há nenhuma pista óbvia, nem nas melhores imagens, que nos diga como os átomos de ouro diferem dos de carbono ou como realmente

se unem para criar seus formatos coletivos. Para isso, temos de abordar o estudo da matéria por um ângulo bem diferente. Essa jornada começou na Índia, na China e na Grécia há mais de dois milênios.



Cílios na superfície de uma bactéria E. Coli.

