



Forma, epistemologia e imagem nas nanociências

Anne MARCOVICH & Terry SHINN



RESUMO

A recorrência, nas pesquisas na nanoescala, da noção de forma (geométrica, arquitetural etc.) e o aumento exponencial da ocorrência de temas ligados à forma servem de ponto de partida para a análise proporcionada por este artigo da significação dessas formas e da epistemologia que lhes está associada. É particularmente interessante construir uma tal epistemologia para as pesquisas na escala nanométrica, na qual são produzidos e manipulados objetos (cristais, materiais biológicos etc.) e na qual se joga com as configurações que eles adquirem, com o propósito explícito de estudar essas novas classes de fenômenos. A importância da noção de forma, para as ciências da nanoescala, é ainda reforçada pelo lugar essencial que ocupam as imagens, tanto nos trabalhos experimentais como nos de simulação. A coincidência das formas nos resultados experimentais e por simulação mostra que a forma torna-se um sistema de explicação, de interpretação, de verificação dos resultados e de compreensão de fenômenos.

PALAVRAS-CHAVE • Cristal. Defeito. Epistemologia. Epitaxia. Forma. Imagem. Morfologia. Nanoescala. Sentido. Significação. Simulação.

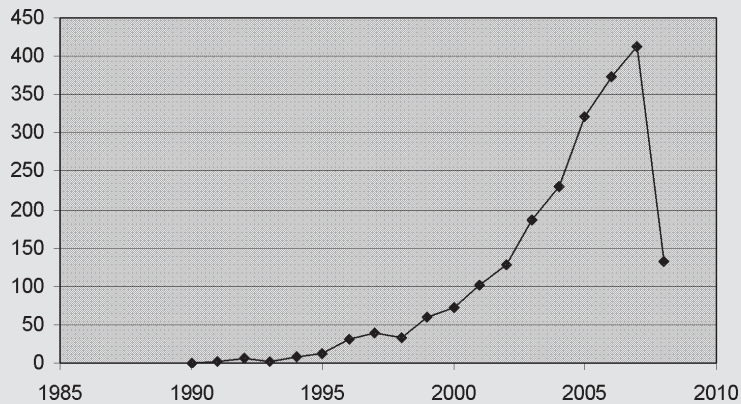
INTRODUÇÃO

Este artigo propõe-se a estudar as relações entre as informações que se podem obter pelo estudo das formas nas nanociências e nanotecnologias (NCT) e a epistemologia que lhes está associada. Esta questão resulta de uma dupla pesquisa: uma, de campo, nos laboratórios de NCT, a outra, bibliométrica; tanto uma como outra dessas pesquisas mostram a preeminência do tema da forma dos objetos nanométricos no campo das pesquisas científicas.

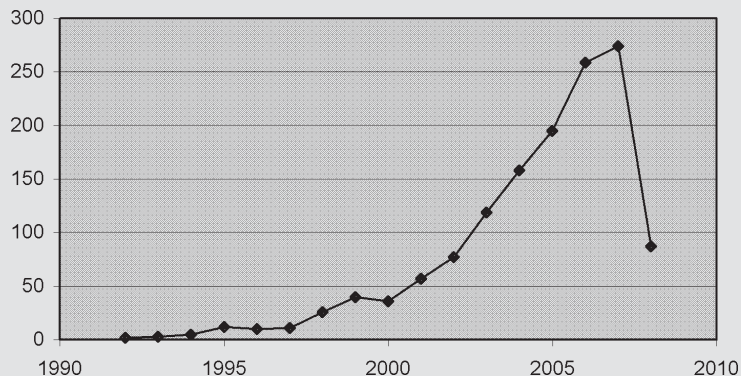
O acesso ao mundo, tal como é dado através da noção de “forma”, parece-nos, com efeito, particularmente palpável nos domínios das nanociências e tecnologias, onde ela se declina em vocabulários diferenciados. Não é nossa intenção fazer o catálogo dos termos utilizados. Podemos, entretanto, abordar certas denominações que se encontram com frequência: “geometria” dá uma ideia de restrição e de regra; “arquitetura” faz apelo ao conceito de “andaime” (“*scaffolding*”), o qual faz pensar em uma estru-

tura que organiza a matéria; “morfologia” fala de modo mais geral e exterior; poder-se-ia, ainda, evocar a ideia de “matriz”, para designar as formas “internas” dos objetos, nas quais o que conta são as interações induzidas e que são particularmente interessantes de serem estudadas, pela distribuição dos elementos que nelas se encontram.

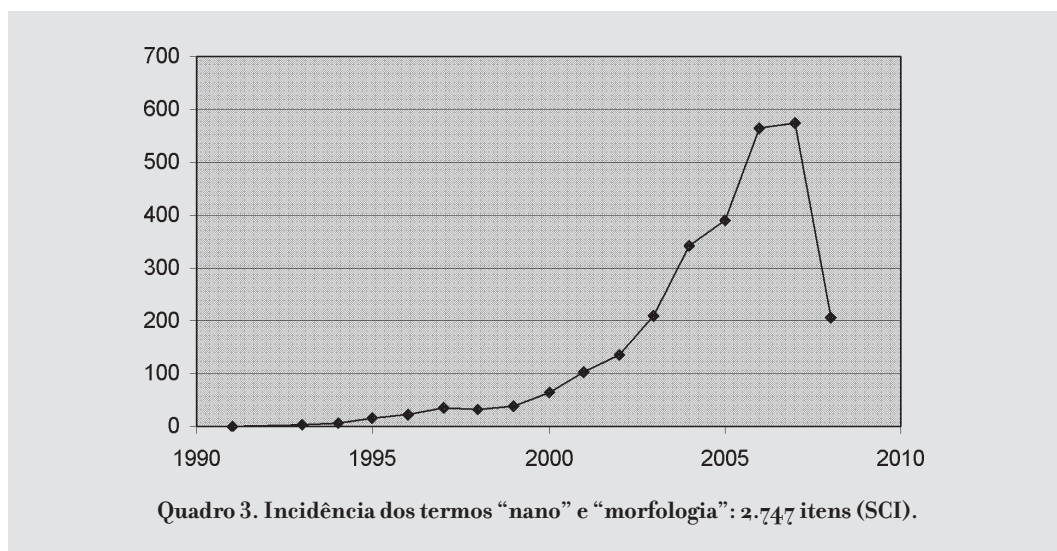
Se a importância das noções de forma emerge claramente de um ponto de vista qualitativo nas NCT, como anunciamos, ela se impõe igualmente sobre um plano quantitativo. Observa-se no *Science Citation Index* (SCI) uma correspondência de incidência dos termos “nano” e daqueles que conotam a noção de “forma”. Essa incidência iniciou-se em 1990 e torna-se espetacular a partir de 2000; a título de exemplo, para “nano” e “forma” (*form*) encontram-se 2.156 itens, para “nano” e “formato” (*shape*), 1.371, para “nano” e “morfologia”, 2.747 (cf. os quadros 1, 2 e 3).



Quadro 1. Curva da incidência dos termos “nano” e “forma”: 2.156 itens, *Science Citation Index* (SCI).



Quadro 2. Curva da incidência dos termos “nano” e “formato”: 1.371 itens (SCI).



Observemos, enfim, que, na história da ciência, nenhuma ação, anterior àquela realizada nas NCT, jamais havia sido empreendida para conceber, construir e explorar as formas de uma maneira sistemática, com o fim de estudar os fenômenos físicos produzidos por essas formas. Constata-se aqui uma circularidade na qual a forma é, ao mesmo tempo, meio e objeto de estudo. Veremos que essa evolução está ligada ao desenvolvimento de novas competências e de novas técnicas. Sublinhemos ainda que essa evolução, que estabelece uma forte ligação entre o projeto para a elaboração de uma forma particular e as características que se estudam nessa forma, deu lugar a geometrias pouco frequentes e, em todo caso, pouco utilizadas na história das ciências. Citaremos alguns exemplos que se tornaram clássicos, tais como os fulerenos em 1985, os pontos quânticos (*quantum dots*) a partir de 1987, os nanotubos em 1991, as nanocavidades introduzidas em 1992 etc.

Assim, o que iremos explorar neste artigo é o encontro, que parece resultar dessa evolução, entre uma reflexão epistemológica sobre as ciências aqui concernidas e a questão das formas. Apesar dessa questão das formas ser abordada em sistemas, tais como os de Aristóteles, de Kant ou ainda de Goethe, cabe notar que a interação e o sistema de reciprocidade entre a forma e a epistemologia não foram estudados de modo sistemático. Com efeito, enuncia-se a hipótese de que não é possível refletir acerca da variabilidade das formas sem refletir, ao mesmo tempo, sobre as epistemologias às quais estão ligadas essas diferentes formas.

I EM DIREÇÃO A UMA EPISTEMOLOGIA DA FORMA

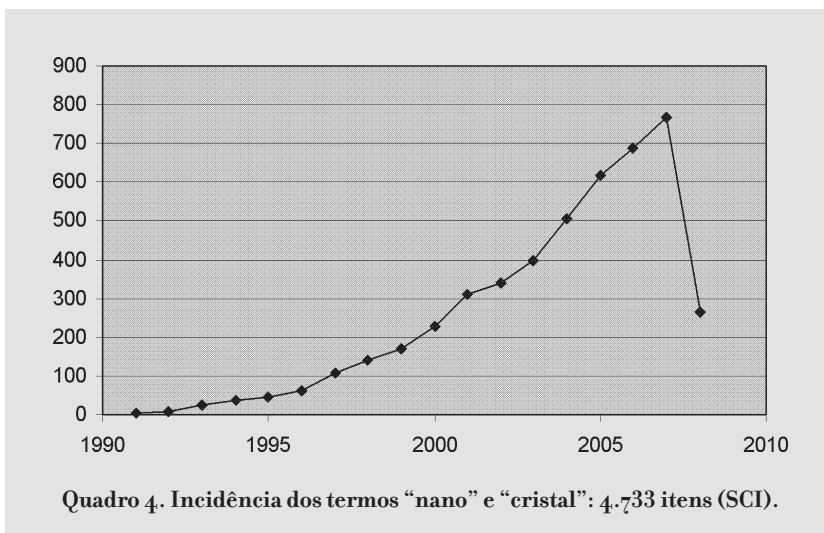
Na química e na física, os fenômenos estudados concerniam, até bem pouco tempo, aos problemas das forças, da tensão, das afinidades eletrônicas, das ligações químicas etc. A física e a química de superfícies e de interfaces levavam em pouca consideração os problemas ligados à forma inscrita nessas faces e interfaces. A situação é totalmente diferente hoje em dia. Embora não se tenha abandonado os aspectos que se acaba de mencionar, a partir do nascimento das NCT, na metade dos anos 1980, pensamos, para as mesmas categorias de objetos, muito frequentemente em termos de forma. A escala nanométrica orienta a atenção, de um lado, para a morfologia das moléculas, de outro lado, para a interação e a geometria local que se instala entre elas e, enfim, para a forma geral da superfície que resulta desses dois primeiros elementos. Intervêm nos parâmetros que determinam a forma dessas superfícies o número e o tamanho dos átomos ou moléculas que as compõem. Ver-se-á, assim, surgir estruturas em forma de escada, superfícies acidentadas e chanfradas segundo linhas paralelas que se organizam alternativamente em vales e picos. Outras geometrias podem aparecer dando a noção de uma grande regularidade com estruturas bordadas como, por exemplo, os fulerenos e os nanotubos. Intervêm ainda nessas geometrias parâmetros tal como o tamanho das moléculas: uma molécula graúda tem a tendência de elevar-se para o alto da estrutura considerada, enquanto as menores encontram suficiente espaço na profundidade e em um confinamento maior. Vemos, assim, que as noções de forma estão igual e estreitamente ligadas àquelas de volume e de tamanho e, reciprocamente, que estas últimas contribuem para determinar a morfologia.

Criamos, descobrimos, utilizamos as formas para estudar, ou mesmo para produzir, fenômenos: as formas fazem parte da interpretação que podemos fornecer, isto é, de que elas podem ser a origem e, ao mesmo tempo, contribuir para a explicação; elas participam, portanto, totalmente da lógica da explicação científica desses fenômenos. Podemos dizer, então, que o lugar tão essencial das formas está fortemente inscrito no fato de que esses fenômenos situam-se nessa escala. Dito de outro modo, não temos propriamente uma nanociência e nanotecnologia, mas pesquisas em nanoescala e nas pesquisas científicas nela desenvolvidas, as noções de forma têm um lugar essencial. Nessa medida, elas fazem propriamente parte da epistemologia dessa ciência que é feita em escala nanométrica.

A questão das formas assume uma importância central na escala nanométrica, em objetos tais como os cristais.¹ A incidência dos termos “nano” e “cristal” nos

¹ Cristal é o termo usual para designar um sólido com formas regulares, apesar desse uso diferir um pouco da definição científica dessa palavra. Segundo a União Internacional de Cristalografia, é um cristal todo sólido cujo espec-

artigos de NCT é ilustrada de maneira espetacular pela curva, no quadro 4. Convém, portanto, deter-se um momento sobre a nova especialidade que fabrica esses materiais, a epitaxia.²



Quadro 4. Incidência dos termos "nano" e "cristal": 4.733 itens (SCI).

2 A EPITAXIA

Entrar em uma "sala branca" de epitaxia (onde se procura manter o ambiente em um estado de máxima pureza), na qual se fabricam cristais, é presságio de uma grande complexidade técnica. Encontram-se associados, com efeito, instrumentos de alta tecnologia que devem trabalhar em conjunto e serem manipulados graças a competências extremamente agudas e segundo protocolos muito precisos. Criam-se, caracterizam-se e desenham-se novos materiais. Podem citar-se o criostato, a bomba de ultravácuo, os eletroímãs, os lasers, os espectroscópicos de diferentes tipos, sem falar do

tro de difração é essencialmente discreto. Tendo por base uma propriedade estrutural essencial, essa definição engloba os cristais clássicos, mas também uma variedade recentemente estabelecida, que se chamou de "quase-cristal". As propriedades empíricas dos cristais explicam-se por dois fatores: sua composição atômica e o arranjo espacial dos átomos. Tradicionalmente, o cristal é um sólido poliédrico mais ou menos brilhante, com estrutura regular e periódica, formado por um empilhamento ordenado de um grande número de átomos, de moléculas e de íons. "Ordenado" significa que um mesmo motivo é repetido para identificá-lo, segundo uma rede regular. A menor parte da rede que permite recompor o empilhamento chama-se "malha". Um monocristal, cuja dimensão é inferior a 100 nanômetros, é uma nanopartícula que se chama também "nanocristal".

² Epitaxia do grego *epi* (acima) e *taxis* (de forma ordenada), de modo que se pode traduzir o termo como "ordenar para cima".

microscópio de tunelamento com varredura (*scanning tunneling microscope* – STM), do microscópio de força atômica (*atomic force microscope* – AFM)³ e, evidentemente, da epitaxia por jato molecular (*molecular beam epitaxy* – MBE), necessária para depositar, sob o ultravazio, camadas de átomos e de moléculas. Cabe notar que cada um desses instrumentos necessita da expertise de um especialista. O diálogo com a matéria não pode ser feito senão desse modo e com um espírito pioneiro que se afasta dos trabalhos de metrologia e de simples observação. Ora, tal espírito pioneiro implica justamente que todas as formas de informação sobre os materiais, incluindo os defeitos, são levadas em consideração. Cabe notar aqui que o defeito é portador de inteligibilidade, tendo nesta perspectiva o estatuto epistemológico de uma forma interessante que se abre para o novo. Voltaremos a essa importante questão sobre os defeitos na seção dedicada aos cristais.

Observe-se, aqui, que o praticante da epitaxia coloca em operação um duplo olhar: de uma parte, ele procura impor formas, de outra, ele está atento a formas que se manifestam nos objetos que ele manipula.⁴ Ele não é mais, nessa perspectiva, apenas um engenheiro que procurará caracterizar os materiais e eliminar-lhes os defeitos, ele pode ser um pesquisador completo, artesão de novas formas. Pode-se perguntar se esses pesquisadores da epitaxia não estão a ponto de tornarem-se os motores no mundo das NCT. E, nesse caso, não assumirão eles uma posição particularmente importante acerca da questão das relações entre as formas e a epistemologia? Observemos, entretanto, que também existem engenheiros praticantes da epitaxia que têm como único propósito a elaboração de materiais padronizados graças a uma técnica tornada rotineira. Constata-se que, infelizmente, estes últimos tornam-se majoritários e que o espírito pioneiro dos primeiros praticantes, tão importante no desenvolvimento das pesquisas em NCT, arrisca ser posto em perigo.

Com efeito, face à crescente dominação das grandes plataformas, nas quais se concentram os créditos e as competências necessárias para o desenvolvimento da epitaxia, os laboratórios, cuja vocação é a pesquisa fundamental, passam a ter uma

³ O microscópio de tunelamento com varredura (*scanning tunneling microscope* – STM) é um microscópio que, graças à variação de intensidade eletrônica entre a ponta do microscópio e o objeto estudado (molécula, átomo) permite seguir o relevo do objeto e manobrá-lo, deslocando-o sobre uma superfície e restituir, graças a um outro dispositivo eletrônico e informático, as imagens desse objeto. As pesquisas que conduziram a esse microscópio ocorreram no início dos anos 1980 e valeram a seus autores o prêmio Nobel de física de 1986. Na medida em que essa técnica depende da corrente passando unicamente no sentido do objeto para a ponta, um outro microscópio, o microscópio de força atômica (*atomic force microscope* – AFM) foi inventado para não ter essa limitação. Como a superfície ascende e descende em relação à ponta, devido a um cantiléver, são produzidas imagens da topografia da superfície que é, assim, percorrida (escaneada).

⁴ Entrevista com A. Lemaître, no Laboratório de Fotônica e Nanoestrutura de Marcoussis (CNRS), por T. Shinn e A. Marcovitch, maio de 2008.

margem de manobra muito pequena para pôr em operação sua própria “sala branca”. Nessas condições, pode-se perguntar em que medida os praticantes da epitaxia correm o risco de ficarem aprisionados cada vez mais a tarefas técnicas de padronização, de produção de amostras pedidas pelos laboratórios e, finalmente, de rotinização desse tipo de trabalho. Tal evolução favoreceria a atitude do engenheiro praticante da epitaxia, enquanto os laboratórios de pesquisa, que possuem os recursos suficientes para assegurar, ao mesmo tempo, todo o processo da epitaxia e o desenvolvimento de pesquisas fundamentais, favoreceriam, pelo contrário, os pesquisadores praticantes da epitaxia.

Pode-se apostar que nesses grandes projetos de divisão do trabalho, nos quais o praticante da epitaxia é somente um executante, corre-se o risco de ver, em última instância, atenuar-se o interesse pelo trabalho sobre as formas que aparecem nos objetos que se manipulam ou pelas formas que se procura criar e na abertura epistemológica que seu estudo suscita. Certas políticas de pesquisa e de organização institucional colocadas em operação favorecem uma em detrimento da outra; evolução que já vemos realizar-se na França.

3 OS CRISTAIS

A expansão das pesquisas nas NCT está muito fortemente ligada ao desenvolvimento das ciências dos materiais e da produção de cristais⁵ (embora eles não sejam os únicos objetos estudados; por exemplo, pode-se citar os polímeros). Os cristais são os objetos prediletos dos químicos e dos cristalógrafos que representam as duas disciplinas mais engajadas em termos de pesquisadores nas NCT. A título de exemplo, os premiados Feynman em nanotecnologia desde 1993 são majoritariamente cristalógrafos de origem. De outra parte, os cristais têm a propriedade particularmente interessante para a pesquisa em NCT de serem autorreprodutíveis e terem a capacidade de auto-organizar-se. Eles podem constituir redes de grande tamanho e de grandíssima complexidade. As novas estruturas, que se aprendem a fabricar desse modo, oferecem características físicas que são um campo de pesquisa de uma riqueza excepcional em óptica, em acústica, em magnetismo, em mecânica fundamental (torsão, dureza, elasticidade etc. dos materiais), em eletrônica e em biologia, por exemplo, com a utilização de pontos quânticos como marcadores luminescentes que permitem seguir o movimento de moléculas introduzidas nos sistemas vivos. Os cristais são, ao mesmo tempo, componen-

⁵ Depois de aproximadamente 40 anos, descobriram-se novas categorias de matérias cristalinas, tais como os quase-cristais, que oferecem desafios e promessas.

tes dos sistemas utilizados nas experiências, objetos de pesquisa em si mesmos e também instrumentos de medida e detecção de fenômenos.

A epitaxia tem progressivamente permitido a criação de cristais confinados, inicialmente, em uma dimensão, com a produção de filmes delgados, em seguida, com duas dimensões, com os nanofios (produzidos pela primeira vez em 1977) e, finalmente, em três dimensões, com os pontos quânticos (*quantum dots*) em 1987. Com os nanofios e os pontos quânticos, exploram-se objetos únicos frequentemente compostos de uma só molécula.⁶

3.1 UMA CATEGORIA DE CRISTAL: AS NANOCAVIDADES

A questão das formas não concerne somente à morfologia exterior de um objeto, essa zona de contato e de trocas com seu ambiente, ela concerne igualmente a sua morfologia interna, isto é, o espaço vazio que está contido no objeto. É difícil produzir de modo controlado um espaço marcado pela ausência de objeto e, em um primeiro momento, não se sabia se seria possível construir essas nanocavidades. A criação da ausência na escala nanométrica constitui em si uma façanha teórica e técnica. Ela foi realizada pela primeira vez em 1992 por pesquisas de simulação e, em 1994, por trabalhos experimentais. Procurou-se construir um volume nanoscópico no interior do qual se poderia em seguida introduzir de maneira controlada objetos (átomos e moléculas). Foi possível fazê-lo, mas em condições drásticas de temperatura; alterar a temperatura modificava a estrutura do volume. A possibilidade de introduzir objetos, seu número e sua posição eram dependentes dessa condição, o que não se havia inicialmente previsto.

Devido a sua forma e ao confinamento que ela impõe, a cavidade, ao mesmo tempo, provoca e é constitutiva do fenômeno estudado. Este último, em virtude de seu confinamento, torna-se um objeto do qual podemos examinar as formas. Por exemplo, falaremos de vibrações “replicadas” no seio de uma super-rede, de modo que essa morfologia particular de uma onda abre novas perspectivas de pesquisas.⁷ O confinamento do espaço próprio aos objetos de tamanho nanométrico faz que esse espaço possua dimensões iguais ou inferiores aos comprimentos característicos dos fenômenos

⁶ Entrevistas com V. Voliotis e R. Groussin, do Instituto de Nanociências de Paris (NSP), por T. Shinn e A. Marcovich, outubro de 2007. Os entrevistados pertencem à equipe de pesquisa sobre “nanoestrutura e sistema quântico; nano-objetos individuais”. Entrevista com G. Dujardin, do Grupo de Nanociências Moleculares do Laboratório de Fotofísica Nuclear (CNRS e Universidade de Paris XI), por T. Shinn, junho de 2008. Entrevista com S. Weiss, da UCLA, por T. Shinn e A. Marcovich, julho de 2008.

⁷ Entrevista com B. Jusserand, por A. Marcovich e T. Shinn, outubro de 2007. O tema de pesquisa que está em questão aqui é a espectroscopia Raman de fótons e mágnons nas nanoestruturas, realizada no Instituto de Nanociências de Paris.

que se quer estudar. Por exemplo, as malhas de cristais fotônicos têm o mesmo comprimento que a onda de um fóton. As nanocavidades revelam-se tanto mais ricas quando se compreende que elas podem conter elementos suscetíveis de introduzir um nível de complexidade fenomenológica ainda mais elevado.

É nessa perspectiva que se deve considerar os trabalhos conjuntos em óptica e em acústica, levados a cabo pelo Instituto de Nanociências de Paris; no interior da nanocavidade utilizada, acrescentou-se dois espelhos de Bragg, um deles emissor de ondas ópticas ou acústicas, e o outro receptor dessas mesmas ondas. No caso dos espelhos de Bragg, sua posição respectiva não é aleatória, porque estão localizados de modo a corresponderem-se. Mas outros dispositivos podem, ao contrário, deformar, tornar acidentada a superfície interior da cavidade, induzindo justaposições de corpos que podem acentuar ou mesmo gerar um relevo responsável por perturbações.

No caso dessas pesquisas, temos dois pontos originais: (1) explora-se uma nova categoria de formas interiores que podem ser desiguais pela junção de elementos; (2) em uma só nanocavidade, interagem dois fenômenos de regimes diferentes (óptico e acústico). Poder-se-ia falar de nanocavidades simples ou de nanocavidades complexas. Convém notar que uma colaboração foi montada para estudar essa associação óptica/acústica nas nanocavidades entre duas equipes francesas e uma equipe argentina.⁸ Uma publicação conjunta, fundadora dessas questões, foi feita em 2007 (cf. Lanzillotti-Kimura *et al.*, 2007) e uma escola de verão foi organizada a partir de 2006,⁹ o que mostra o dinamismo em torno dessa problemática.

Encontramo-nos aqui diante de uma epistemologia da forma que se conjuga em três registros:

- (1) uma epistemologia da forma interior das cavidades; essas formas que se fecham sobre o vazio, simples ou complexas; a forma tem aqui como único referente aquilo que faz parte dela mesma, em contraste com um sistema aberto no qual os possíveis referentes são infinitos em número, em qualidade e no espaço.
- (2) Uma epistemologia da forma dos fenômenos que se desenvolvem nessas cavidades; aqui, o sistema está isolado; ele não pode reagir senão em relação a si mesmo e em relação aos efeitos secundários daquilo que ele produziu sobre si mesmo.

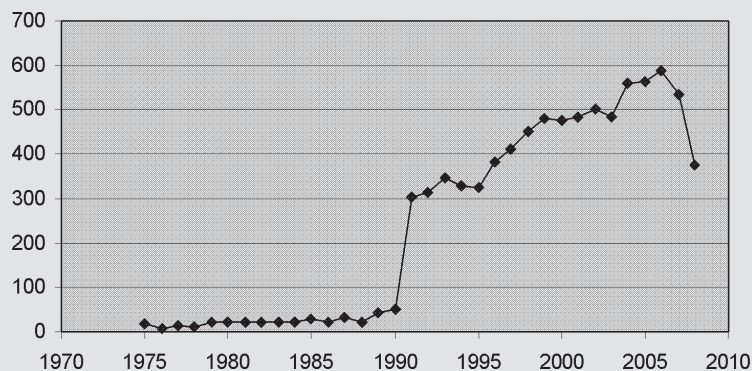
⁸ As equipes de B. Jusserand, sobre nanoestruturas e sistemas quânticos, de B. Perrin, sobre acústica, óptica e térmica ultrarrápidas nos nanossistemas, ambas do Instituto de Nanociências de Paris, e a equipe de A. Fainstein do Instituto Balseiro, Centro Atômico Bariloche, CNEA, Bariloche, Argentina.

⁹ “Som e luz: da microfotônica à nanofotônica”. A primeira universidade de verão ocorreu em Cargèse, França, outubro de 2006.

- (3) Uma epistemologia do conjunto formado pelas duas primeiras, isto é, uma epistemologia da forma das matrizes, as quais são compreendidas, nesse caso, ao mesmo tempo, como suporte material e concreto nos quais se desenrolam os eventos e tudo o que elas podem conter em seu seio.

3.2 Os DEFEITOS

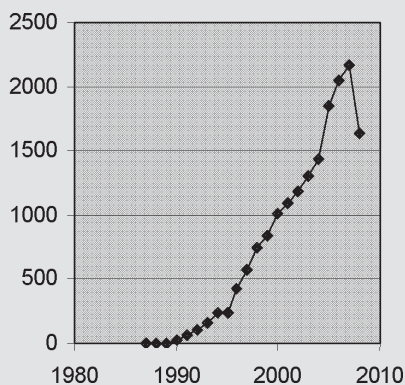
Os defeitos que surgem nos cristais fabricados em NCT também evidenciam a centralidade das formas nesses domínios. Os defeitos adquirem um papel importante que depende de suas configurações intrínsecas – degraus, encaixes, articulações etc. – e que, entre outros fenômenos, são associados à oxidação, à hibridação etc. Os defeitos de um cristal induzem múltiplas geometrias nesse cristal. Pode-se citar diferentes tipos de defeitos: os *defeitos pontuais*, que são a ausência de um átomo em um lugar onde esperaríamos encontrá-lo, um vazio; os *defeitos intersticiais*, que são a incrustação de um átomo entre as malhas do cristal e, portanto, em um lugar onde ele deveria ter um vazio; as impurezas que surgem da presença de um átomo estranho à composição normal do cristal; existem, também, os defeitos que afetam uma camada inteira, a qual é como que cortada e as camadas adjacentes reformam as ligações entre si segundo a arquitetura habitual. Esses tipos diferentes de defeitos induzem geometrias particulares não previstas inicialmente e que afetam os fenômenos que se desenvolvem em seu seio.



Quadro 5. Incidência dos termos “cristal” e “defeitos”: 8.276 itens (SCI).

Pode-se imaginar que se detectam esses defeitos graças ao estudo do *spin* dos elétrons, ou às forças de Van der Waals. Ora, com os objetos nanométricos, nota-se um defeito graças aos fenômenos induzidos pela forma desse defeito. Ou dito de outro modo, é a geometria do objeto em questão que, em uma espécie de circularidade, provoca um fenômeno e permite a sua detecção. Por exemplo, em uma folha de grafeno (camada bidimensional de grafite), todos os átomos estão organizados em anéis de seis átomos. Se a folha contém regiões nas quais o número de átomos em um anel não é seis, enquanto o número total de átomos que resta é o mesmo, então forma-se um defeito topológico. Assim, um defeito na parede de um nanotubo terá um anel com cinco átomos adjacente a um outro anel com sete átomos.

Os defeitos representam acontecimentos indispensáveis no processo de fabricação dos objetos nanométricos. Ora, esses defeitos pertencem ao desenvolvimento da pesquisa, não apenas para eliminá-los em certos casos, mas também e, sobretudo, para caracterizá-los, estudá-los, controlá-los e reproduzi-los. Eles são peças mestras nos trabalhos de NCT. Um exemplo disso é a história dos pontos quânticos (*quantum dots*). Na fabricação de nanofios, insinua-se defeitos que se procurou inicialmente eliminar. Mas, ao voltar-se para o estudo de suas propriedades, percebeu-se, no início dos anos 1980, que apresentavam características muito interessantes do ponto de vista dos efeitos ópticos e eletrônicos. Os pontos quânticos tornam-se, assim, nano-objetos vedetes na panóplia dos materiais utilizados, e eles não são interessantes apenas pelos efeitos físicos que geram, mas também porque podem servir para os trabalhos em biologia, como marcadores (ver o quadro 6).



Quadro 6. Incidência do termo “pontos quânticos” (“*quantum dots*”): 17.124 itens (SCI).

4 FORMAS E IMAGENS

Nas NCT, fala-se frequentemente em termos de imagem (cf. Galison, 1997).¹⁰ Ora, essas imagens remetem a uma natureza concreta e quase completa, no sentido de que ela oferece asperidades e acidentes de curvas e de formas que se encontram no mundo macroscópico. Elas oferecem uma visão de paisagens quebradas, de relevos por vezes revoltos, de formas tortuosas ou, ao contrário, de estruturas muito regulares, como os nichos das colméias de abelhas (imagem que se encontra com muita frequência). Elas colocam-nos em presença de realidades que podem facilmente parecer familiares (ver figura 1). Nesse sentido, elas podem servir para um primeiro nível de comunicação, que inclui a comunicação com o público leigo. Mas elas também podem induzir intuições entre os cientistas. O pesquisador que vê a imagem dos átomos poderá sentir, mais do que aquela do público iniciante, uma emoção ligada a seu próprio conhecimento dos átomos; ele vê um objeto do qual ele conhece a complexidade e, ao mesmo tempo, ele poderá compreender que certa mancha no meio da imagem ou que certo relevo corresponde a certo fenômeno físico. Já percebemos, assim, que as imagens têm aqui um duplo estatuto: aquele da emoção de descobrir as paisagens da matéria que nos constituem e que constituem o nosso ambiente, em escalas normalmente inacessíveis aos nossos sentidos, e outro de conter informações muito precisas sobre o que aí se desenrola. Se, para os cientistas, o segundo desses níveis, o da informação e da análise, pode ser o mais evidentemente útil para as suas pesquisas, o primeiro, o da emoção e do espetacular, não deve ser negligenciado. É este que permite ter acesso a uma espécie de totalidade, a um conjunto que se abre aos sentidos como um quadro o qual se pode contemplar, primeiro, para as formas gerais que ele nos deixa ver, depois, um quadro no qual se penetra progressivamente, analiticamente, seguindo a melodia particular da qual ele nos dá as chaves. Existem os dois níveis, e todos os territórios entre os dois, nos quais se encontram o imaginário, a analogia, a intuição etc. A imagem torna-se uma fonte de possíveis analogias com as formas exploradas anteriormente ou com as observações realizadas em outras configurações de experiências, a saber, em outro domínio científico.

Cabe observar que, apesar da nanoescala ser um mundo sem cor, as imagens nas NCT são na realidade muito coloridas; e pode-se conceber que essas cores não são escolhidas com o único propósito de comunicação para um público amplo, mas respondem a necessidades específicas da ciência. Para Goethe, a escolha da associação de cores não é aleatória. A física Marie Farge tentou construir uma sistemática que resultasse

¹⁰ As imagens dos objetos nanométricos são obtidas graças a um conjunto de instrumentos que, após o tratamento informático dos dados obtidos, reconstituem as imagens desses objetos.

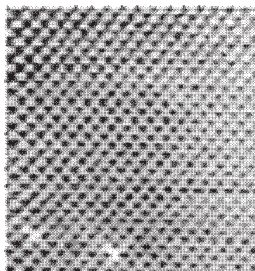


Figura 1a. Imagem de tipos de fenômenos em NCT. Imagem de resolução atômica (modo topográfico) à temperatura ambiente de $2H-NbSe_2$. Dois defeitos de tamanho atômico são claramente visíveis na parte esquerda inferior da imagem.

Dispositivos quânticos controlados: nanofabricação e propriedades eletrônicas. Disponível em: <http://www.insp.upmc.fr/axe1/Dispositifs%20quantiques/themes_dispo_quantiques.php>.

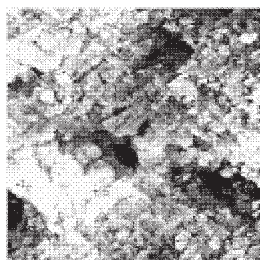


Figura 1b. Filme fino de $BiSrCaCuO$ (MBE, desenvolvido por J.-B. Moussy, ESPCI). O campo de visão é $250\text{ nm} \times 250\text{ nm}$.

Dispositivos quânticos controlados: nanofabricação e propriedades eletrônicas. Disponível em: <http://www.insp.upmc.fr/axe1/Dispositifs%20quantiques/themes_dispo_quantiques.php>.

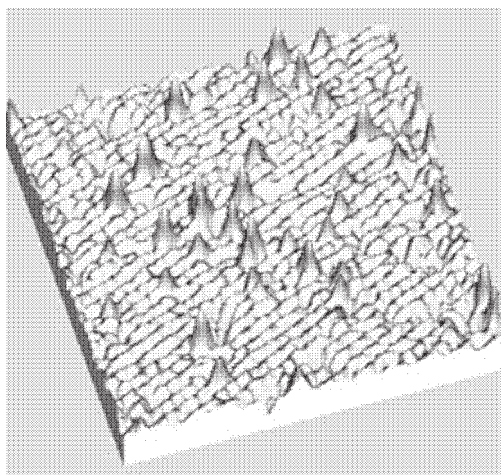


Figura 1c. Imagem de microscopia com efeito de tunelamento (STM) ($20\text{ nm} \times 20\text{ nm}$) de moléculas de fenilacetileno dispostas sobre uma superfície de silício.

Físico-química das superfícies funcionais. Organizações moleculares sobre silício. Disponível em: <http://www.insp.upmc.fr/axe2/surfaces_fonctionnelles/themes_surfaces.php>.

em critérios estandardizados na escolha de certas associações de cores nas publicações científicas (cf. Daston & Galison, 2007, p. 405-6). Sua tentativa não foi aceita. Mas ela tampouco foi refutada e pode-se imaginar que, por trás da subjetividade das impressões induzidas pela utilização de determinadas cores, construiu-se uma ordem na qual a justaposição de certas cores e a quase interdição da associação de outras corresponde a um código, e na qual esse código contribui para fazer emergir as formas e um sentido mais ou menos definido que lhes estaria vinculado.

As cores servem para evidenciar as formas. Mas elas não dão necessariamente a ideia de relevo, de paisagem, de estrutura mais ou menos acidentada ou, ao contrário, regular, como as apresentadas na figura 1. Sua escolha serve para estabelecer os contrastes entre os diferentes componentes do objeto estudado e suas características (rugosidade, carga eletrônica, temperatura, nível de energia etc.). O relevo que diferencia os níveis topográficos é frequentemente melhor representado pelos graus de cinza. Todavia, essas cores, esses cinzas e essas formas nada dizem sobre a escala na qual estamos situados nessas imagens. Uma estrutura em casulos de abelhas, dada sem legenda, poderá ser interpretada, tão bem como uma verdadeira colméia, uma tela de tecido grosseiro, uma grade fina ou uma superfície nanométrica. O caráter familiar dessas imagens abre, nesse sentido, uma dificuldade que é justamente a dessa analogia de formas entre os objetos macroscópicos e nanoscópicos, a saber, “angstromscópicos”.

As imagens mostram o quanto a forma torna-se central nos trabalhos conduzidos em escala nanométrica. Ela adquire um peso preponderante na própria escolha dos materiais utilizados para as pesquisas nos diferentes domínios científicos. Na química, como observa Chad Mirkin, situamo-nos na escala do angstrom,¹¹ e a dificuldade, se quisermos trabalhar na escala nanométrica, está em encontrar as moléculas muito grandes. Na nova química de Stoddart, encontramos-nos em um “jogo de legos”, que promete desembocar na elaboração de “comutadores elétricos” e não mais na de forças eletrônicas. Para Mark Ratner, o domínio que tem uma verdadeira adequação com as formas, as imagens e a escala nanométrica é a biologia.¹² As formas, tais como estudadas em NCT, tornam porosas as fronteiras que separam os domínios. Mas a perspectiva da disciplina na qual cada um foi formado permanece sempre marcante;¹³ e é interessante constatar que, mesmo tomando os objetos biológicos como material de estudo, os físicos conservam sua lógica e suas problemáticas de físicos. Voltaremos a isso mais adiante.

¹¹ O angstrom é uma medida de comprimento da ordem de 10^{-10} metros.

¹² Entrevistas com C. Mirkin, F. Stoddart e M. Ratner, da Universidade de Northwestern, por T. Shinn, entre janeiro e abril de 2008.

¹³ Entrevista com M. Cohen, por T. Shinn, janeiro de 2008.

5 A SIMULAÇÃO

A simulação constitui um caso particularmente interessante para nosso estudo sobre a relação entre a forma e a epistemologia. É uma combinatória de algoritmos com um número de parâmetros muito importante. Trata-se de um cenário de abstração, que permite fazer escolhas em todos os níveis físicos: matéria, temperatura, pressão, condições de confinamento etc. Pode-se inventar novas formas de materiais; observar como eles se comportam e obter modelos e leis.

De certa maneira, a simulação encontra-se em uma espécie de espaço intermediário entre a ciência teórica pura (“teoria de papel e lápis”) e a ciência experimental. Ela produz modelos preditivos ou interpretativos. Eles se apresentam, como nas pesquisas experimentais, sob diferentes formas: curvas, espectros, imagens etc.

Uzi Landman exprime os motivos intelectuais que o orientaram para a simulação como segue:

Por que faço simulação? Por que faço experiências numéricas ao invés de experiências reais? É porque não sei fazê-las. Não tenho a competência para realizar verdadeiras experiências laboratoriais (...). Tenho uma formação de químico teórico e, logo após minha tese, orientei-me para a física teórica, depois interessei-me em fazer modelos (...). Eles se tornaram a minha caixa de ferramentas. Gosto de fazer modelos. Pouco importa se são modelos físicos complicados, se é um problema de sociologia de populações ou, ainda, um modelo biológico; gosto de fazer modelos que descrevam as coisas. Para mim, é como construir máquinas. Se você coloca rodas suficientes nessa máquina, ela poderá mover-se em todas as direções.

Assim, os modelos são feitos a partir de uma descrição simples, depois acrescentam-se elementos que são aperfeiçoados de maneira a corresponder a qualquer outra coisa e, em seguida, pode-se até mesmo ir além daquilo que está fundado nos princípios da física. E, assim, pode-se ainda perguntar: “o que acontecerá, se eu também mudar isso?” Temos controle sobre nosso modelo e, ao mesmo tempo, pode-se começar a explorar novos fenômenos. Essa é a razão pela qual faço simulação. A ideia de estudar a natureza graças aos computadores era originariamente improvável. As coisas têm evoluído de tal maneira que hoje em dia, acredito, a simulação é um dos pilares da metodologia científica.¹⁴

¹⁴ Entrevista com U. Landman, do *Georgia Institute of Technology*, por T. Shinn, janeiro de 2008.

Landman explica que, em 2000, ele teve a sorte de descobrir por simulação nanojatos de cerca de 10 nanômetros de diâmetro. A questão inicial era: o que se produzirá, quando se tenta produzir um jato de líquido que não ultrapasse os 10 nanômetros? Será que as moléculas do líquido vão permanecer juntas ou vão antes comportar-se como um sopro de gás? O resultado foi que o jato manteve-se durante um curto período antes de estourar em gotículas. É então possível ver claramente que, em mecânica dos fluidos, as leis de Navier e Stokes para a viscosidade e para os graus de velocidade não podem ser aplicadas aos materiais nanométricos que estão, nesse sentido, fora do âmbito de predições dessas leis e, portanto, de seu quadro epistemológico. Isso dá à simulação uma importância central para esses tipos de pesquisa. Uma equipe do laboratório de Landman efetuou experiências que verificaram os resultados que ele obteve por simulação.

Essa verificação mútua entre simulação e experiências tornou-se um protocolo habitual nas pesquisas em numerosos domínios, dentre os quais também o das NCT. Uma equipe do Instituto de Nanociências de Paris, que trabalha com os mecanismos

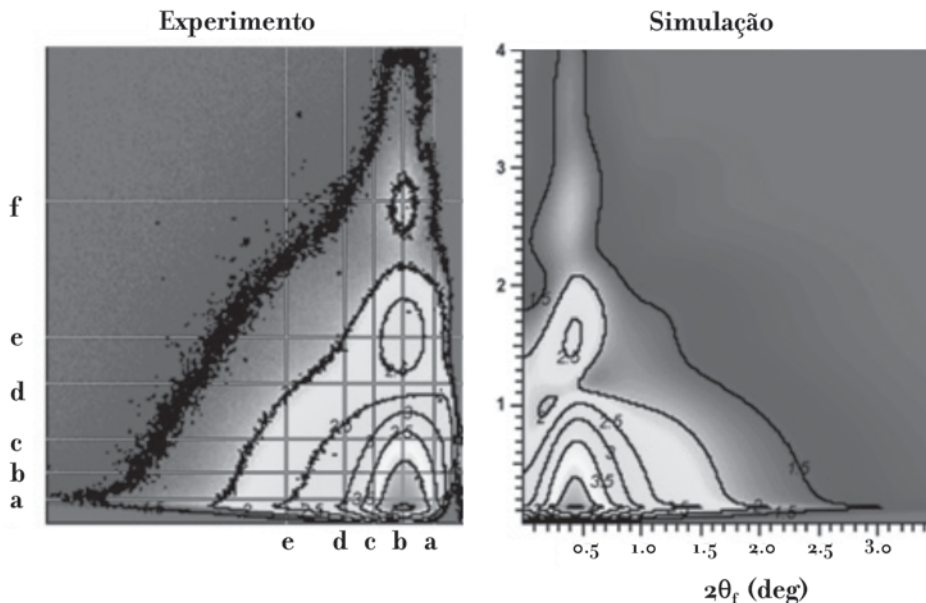


Figura 2. Simulação e clichê experimental de GISAXS obtido sobre um catalisador do modelo Au/TiO₂(110). As partículas estão bem modeladas por esferas truncadas ($R \sim 2$ nm, densidade $\sim 4 \cdot 10^{12}$ cm⁻², $\epsilon \sim 125^\circ$). Simulação e clichê experimental dos primeiros estados de crescimento de Na / TiO₂(110), por cálculos *ab initio* e EXAFS de superfície.

Mecanismo de crescimento das interfaces metal/óxido: de ultra-vida nas condições ambientais. Disponível em: <http://www.insp.upmc.fr/axe2/Oxydes/theme2_mecanismes.php>.

de crescimento das interfaces metal/óxido, publica seus resultados muito concordantes, conjugando as imagens obtidas tanto por simulação como por experimentação. As duas imagens que se observam como em um espelho (cf. figura 2) descrevem a forma do fenômeno estudado. A importância dessas imagens reside no fato de que duas orientações epistemológicas (a simulação e a experimentação) convergem em uma realização. Essa impressão de realização está, em grande medida, fundada no caráter coerente que oferecem, como tínhamos visto acima, as imagens. Mas ela é ainda reforçada pelo encontro entre duas operações epistemológicas que procuram responder uma à outra.¹⁵

A coincidência das formas entre os resultados experimentais e os resultados por simulação mostra que a forma se torna também aqui um sistema de explicação, de interpretação, de verificação dos resultados e de compreensão dos fenômenos. Temos, com efeito, uma epistemologia da simulação alicerçada em uma combinatória e uma epistemologia da experimentação física fundada na matéria. As formas e as imagens que são divulgadas por cada uma dessas perspectivas frequentemente se unem ou, antes, recobrem-se. Esse encontro cria uma terceira epistemologia que põe em consideração as imagens e as formas obtidas por simulação enquanto aquelas obtidas por experimentação põem em movimento um jogo de espelhos entre as duas que traz em si mesmo uma nova epistemologia na qual os autores podem levar em consideração as restrições e as aberturas disponíveis no encaminhamento do outro. A epistemologia da forma que assim se desenvolve é, nessa perspectiva, proveniente de uma dinâmica da qual seria interessante explorar todas as consequências.

Essa epistemologia poderia fundar-se sobre uma noção intrínseca ao próprio desenvolvimento da simulação, isto é, sobre a noção de modelo. No caso da ruptura de simetria de Landman,¹⁶ é possível ver o potencial do modelo que permite superar a dificuldade em utilizar as leis físicas elaboradas para os sistemas maciços, na escala nanométrica. Em seus trabalhos de simulação, Landman confirma os resultados experimentais, demonstrando a especificidade das quebras de simetria na escala nanométrica.¹⁷ Essa questão é conhecida há muito tempo na física, mas ela tem uma significação particular nas NCT. Como diz Landman:

¹⁵ Entrevista com J. Jupille, novembro de 2007, e com F. Finochi, abril de 2008, por T. Shinn e A. Marcovich.

¹⁶ Entrevista com U. Landman, por T. Shinn, janeiro de 2008.

¹⁷ Lembre-se até que ponto essa questão das quebras de simetria é central na física e na astrofísica. O prêmio Nobel de física de 2008 recompensa os trabalhos visionários no domínio da física de partículas que fizeram intervir a noção capital de “quebra de simetria”. Os três laureados são de origem japonesa, apesar de um deles, Yoichiro Nambu, ter se naturalizado americano. Os outros dois ganhadores, Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa tornaram-se ilustres, tal como Nambu, por seus trabalhos acerca das interações nucleares.

Até recentemente, quando descrevia um sistema físico de simetria, dois princípios eram utilizados (...). Essa aproximação foi estabelecida nos anos 1940 e manteve-se nas décadas de 1950 e 1960. Mesmo nessa época, os químicos compreenderam que, em certas condições, as moléculas não obedeciam rigorosamente a esse princípio, mas os fundamentos dessa lei física não eram conhecidos (...). Em um ponto quântico, por exemplo, os elétrons estão confinados a uma simetria. O domínio da simetria é o círculo. E o estado dos elétrons é circular. Mas a natureza não tolera esse arranjo na escala nanométrica. O único método para manter essa simetria é o de abaixar o nível de energia do elétron.¹⁸

Contudo, explica Landman, se não se faz isso, a simetria rompe-se espontaneamente. Assim, quando o confinamento perpetua-se em uma forma circular, os elétrons começam fortemente a tomar de preferência a forma de triângulos e podem ser localizados de uma maneira específica. Começa a formar-se um “gás de elétrons” ou “fluidos de elétrons”¹⁹ ou aquilo que se chama por vezes de “cristais de elétrons” (cf. Filinov *et al.*, 2001). “Essa quebra de simetria espontânea distingue notavelmente as NCT de outros domínios da física”, conclui Landman, indicando com ela o nascimento de um novo paradigma.²⁰

Se a simetria desaparece, não seria necessário levar em consideração uma epistemologia alternativa que tomaria em consideração a importância da quebra de simetria? Não seria também necessário encontrar uma epistemologia do movimento, ou seja, uma epistemologia da passagem de um estado, confinado e ordenado sob a forma de simetria, para um estado mais “natural”, que anula a ordem construída pelo confinamento?

6 OS MATERIAIS BIOLÓGICOS

Se antes do advento das NCT, os materiais biológicos eram exclusividade das ciências da vida, eles tornaram-se depois interessantes para o estudo dos fenômenos físicos. A capacidade de automontagem e a facilidade da imposição de formas específicas fazem desses materiais elementos essenciais para a produção de outros materiais. Entre eles, o ADN é uma molécula-guia, ao mesmo tempo, andaime que induz geometrias

¹⁸ Entrevista com U. Landman, por T. Shinn, janeiro de 2008.

¹⁹ Supõe-se que a valência dos elétrons provém da liberação completa de seus íons (“gás de elétrons”). Como em um gás ideal, as interações elétron-elétron são negligenciáveis (elas são muito fracas devido ao efeito de blindagem).

²⁰ Entrevista com U. Landman, por T. Shinn, janeiro de 2008. Essa observação é compartilhada por J. Gimzewski (UCLA), também laureado com o prêmio Feynman de 1997. “Ela necessita de profundas pesquisas”, diz ele, em entrevista a T. Shinn, fevereiro de 2008.

particulares e estrutura informacional profunda; é uma matriz a partir da qual podem ser realizadas e geradas múltiplas operações.

Paul Rothemund concebe, manipula e ordena formas de objetos nanométricos, a partir de cadeias de ADN. Existem duas maneiras de produzir ADN: uma se faz em todo organismo vivo, por síntese natural, a outra, artificialmente. Em seus trabalhos, Rothemund utiliza as duas.²¹ Ele toma o ADN inteiro de um vírus, que é a maneira mais simples e mais econômica de obter uma longa cadeia de ADN. Por outro lado, ele sintetiza pedaços relativamente curtos de ADN. Graças às ligações químicas que ele provoca entre as extremidades desses segmentos com a longa cadeia de ADN, ele modela arquiteturas muito complexas, as quais ele chama de “origami de ADN”, e que podem constituir formas com até 200 dobras! Essas formas produzidas à vontade podem tomar a aparência de uma máscara, mas também a de “padrões” cujo desenho muito preciso, decidido de início, permite acolher um ponto quântico ou mesmo outra molécula como, por exemplo, um nanotubo ou ainda uma proteína, e impor-lhe uma geometria determinada. As dobras e as figuras que se extraem dessas arquiteturas são portadoras de informações inscritas na estrutura das moléculas de ADN, que contêm em si um código. Essa particularidade faz dessas estruturas instrumentos para coleta, para a emissão e para a transmissão de informações. Os códigos contidos nas sequências das bases de ADN, ACGT,²² as quais possuem propriedades químicas específicas, têm uma capacidade diferente de ligação com outras moléculas; assim, dependendo de qual é a sequência de ADN encontrada, devido à forma desse origami particular, a informação que ela contém não será a mesma no interior dessa arquitetura ou no exterior.

Em uma perspectiva diferente, P. Winfree utiliza as propriedades de automontagem do ADN a partir da geometria que se elabora no momento da formação de um cristal de ADN, ou “telha”, para a produção de uma estrutura molecular que servirá para a elaboração de um algoritmo concebido.²³ Esses algoritmos constituem programas de informática suscetíveis de gerar operações aritméticas. Todavia, Winfree não sabia inicialmente o que na estrutura da telha determinaria o algoritmo. Trabalhando com Rothemund, eles descobriram que a forma da telha era decisiva e, mais precisamente, a borda da telha. Ora, a textura dessa borda adquiriu, assim, um lugar central. Se ela apresentar uma rugosidade, chanfraduras ou, ao contrário, uma superfície lisa, os conteúdos do algoritmo poderão ser transformados, ou mesmo, anulados.

Embora, em numerosos casos, as superfícies e os volumes dos objetos sejam estudados graças às imagens que recebemos de instrumentos como o STM ou o micros-

²¹ Entrevista com P. Rothemund, do Caltech, por T. Shinn, janeiro de 2008.

²² A adenina, a citosina, a guanina e a timina são as quatro bases a partir das quais são formadas as cadeias de ADN.

²³ Entrevista com P. Winfree, do Caltech, por T. Shinn, fevereiro de 2008.

cópio eletrônico, aqui, é necessário que se faça um contato tangível entre a telha e o instrumento, como quando se lê com o sistema Braille seguindo um texto graças à sucessão de relevos e de depressões, o AFM, que serviu para detectar a geometria particular dessa superfície, deslocou o seu sistema tátil ao longo da borda da telha e, assim, pôde recompor todas as informações necessárias para compreender a organização espacial de cada elemento da borda dessa telha.

O exemplo dessa pesquisa revela aspectos da relação entre forma e epistemologia, os quais levantam novas questões. Para a geometria que lhe é própria e que é determinada pelos elementos que a compõem, uma molécula, capaz de autorreprodução, torna-se a matriz de informações tão complexas que elas constituem, na realidade, as bases para uma operação tão elaborada quanto um algoritmo. Aqui, a noção de matriz une muito fortemente a forma e os sentidos. Por outro lado, a descoberta das particularidades de um objeto nanométrico – graças a uma exploração de tipo tátil e, assim, à nova centralidade dos volumes permitida por essa aproximação – faz adentrar em um novo tipo de epistemologia. Isso levanta a questão de saber se os modelos de moléculas feitos com resina ou silicone, que são com muita frequência considerados como puramente estéticos ou simples recursos pedagógicos para ensinar as crianças, poderiam ter um valor bem mais profundo.²⁴

Tal como estudados nos procedimentos relatados neste artigo, os materiais biológicos concernem às ciências físicas. Nas ciências da vida, não é preciso dizer que uma grande diversidade de materiais na escala nanométrica é objeto de pesquisas intensas e variadas, nas quais se empregam evidentemente as proteínas e o ADN, principalmente por sua propriedade de autorreplicação. Não é nosso propósito neste texto analisar esse aspecto da questão. A importância que o ADN assumiu enquanto material para a pesquisa fundamental e aplicada na física e, em particular, como vimos, devido ao fato de sua arquitetura e de sua forma exterior, mostra que a relação forma-epistemologia nas ciências físicas e nas ciências da vida está no centro das singularidades que lhes são específicas ou, ao contrário, de pontos em comum que ligam seus procedimentos.

Isso introduz a questão de saber se as ciências físicas e as ciências da vida constituem em si universos separados e delimitados ou, ao contrário, se as convergências e as zonas de recobrimento tornam-nas congruentes, pelo menos nas NCT. Com efeito,

²⁴ Como Myers (2008) explica, se a representação do mundo molecular virtual, por computador, é incontestavelmente dominante, ela mostra, ao mesmo tempo, como o personagem principal de seu estudo exprime a estrutura e a dinâmica dos objetos físicos através de posturas e de gestos de seu corpo. Vemos, talvez, o que pode ser a manutenção do tangível, assim como nos modelos em silicone. Nos trabalhos de Francoeur (1997), essa questão também é colocada (Entrevista com M. Ratner, por T. Shinn, abril de 2008).

como observamos anteriormente, essa tendência é reforçada pelas imagens feitas a partir das morfologias, arquiteturas, geometrias etc. dos objetos das NCT.

Podemos perguntar se a questão das formas nas NCT não impregna também outros domínios da pesquisa científica e de que modo. Com efeito, falamos da forma das galáxias na astronomia, da forma das correntes hidrológicas na oceanografia, dos turbilhões de nuvens na meteorologia, da morfologia das placas continentais na geologia e nas ciências da Terra, da forma das turbulências na física de fluidos, da forma dos montes de areia na física de materiais moles ou de todos os materiais granulados etc. Além disso, a emergência das imagens enquanto meio privilegiado de expressão dos dados científicos reflete a crescente importância das formas na ciência. As imagens transmitem as formas e, ao mesmo tempo, acompanham a dinâmica que faz dessas formas os pontos salientes da epistemologia que é subjacente ao procedimento científico.

A centralidade das formas poderá ser um marcador essencial na transformação científica e um instrumento de circulação, de sinergia e de transversalidade entre as ciências. Nesta perspectiva e, em vista dos desenvolvimentos precedentes, podemos legitimamente começar a refletir sobre uma cultura do procedimento científico articulada em torno da noção de morfologia. Esta última interrogação leva-nos a uma reflexão mais ampla acerca de uma cultura da forma que ultrapassaria os limites da ciência e englobaria outras expressões culturais.☉

Traduzido do original em francês por Pablo Rubén Mariconda e Claudemir Roque Tossato

Anne MARCOVICH

Pesquisadora da Maison des Sciences de l'Homme,
Paris, França.

Anne.marcovich@free.fr

Terry SHINN

Pesquisador do GEMAS (UMR 8598),
Maison des Sciences de L'Homme, Paris, França.

shinn@msh-paris.fr

ABSTRACT

The recurrence, in research at the nanoscale, of the notion of form (geometrical, architectural, etc), and the exponential growth of the occurrence of themes linked with form, are the starting points for the analysis that this article provides of the significance of these forms and the epistemology associated with them. It is particularly interesting to construct such an epistemology for investigation at the nanoscale – where objects (crystals, biological materials etc.) are produced and manipulated, and where we play with the configurations that they acquire with the explicit purpose of studying these new classes of phenomena. The importance of the notion of form in nanoscale sciences is also reinforced by the essential place occupied by images in both experimental works and simulations. The coincidence of forms in experimental results and in simulations shows that form becomes a system of explanation, of interpretation, of verification of results and of comprehension of phenomena.

KEYWORDS • Crystal. Defect. Epistemology. Epitaxy. Form. Image. Morphology. Nanoscale. Sense. Significance. Simulation.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DASTON, L. & GALISON, P. *Objectivity*. New York: Zone Books, 2007.
- FILINOV, A. V. et al. Frozen electrons. *Physical Review Letters*, 86, p. 3851, 2001.
- FRANCOEUR, E. The forgotten tool: the design and use of molecular models. *Social Studies of Science*, 27, 1, p. 7-40, 1997.
- GALISON, P. *Image and logic: a material culture of microphysics*. Chicago: The University of Chicago Press, 1997.
- LANZILLOTTI-KIMURA, N. D. et al. Coherent generation of acoustic phonons in an optical microcavity. *Physical Review Letters*, 99, 21, p. 7405, Nov. 2007.
- MYERS, N. Molecular embodiments and the body-work of modeling in protein crystallography. *Social Studies of Science*, 38, 2, p. 163-99, Apr. 2008.

