

Vedere e manipolare gli atomi: dal sogno di Feynman ai materiali del futuro

Carlo Enrico Bottani

Infine quei corpi che appaiono duri
e compatti bisogna che d'atomi
adunchi sian fatti e quasi ramosi,
insieme costretti saldi all'interno:
tra questi per primo figura il diamante
assuefatto a spregiare ogni colpo
e le solide selci e il rigido ferro...

Tito Lucrezio Caro (98-54 a.C.) "De rerum natura"

Uno scienziato la cui ricerca rispetto, ha osservato che
"quando uno scienziato sostiene che qualcosa è possibile,
probabilmente sottovaluta quanto tempo sarà necessario per
realizzarlo. Ma se dice che è impossibile, ha probabilmente
torto." Lo scienziato in questione è, naturalmente, Lei stesso.

Da una lettera aperta di Eric Drexler a Richard Smalley (16 aprile 2003)

Il ruolo cruciale dei materiali nella società del futuro

Nel dicembre del 2004, in uno dei suoi ultimi interventi pubblici, il compianto premio Nobel Richard E. Smalley, parlando nell'ambito del simposio *Frontiers of Materials Research* durante il Materials Research Society Fall Meeting a Boston, discute il ruolo dei nuovi materiali nella soluzione dei dieci problemi più critici del futuro: energia, acqua, cibo, ambiente, povertà, terrorismo e guerra, malattia, educazione, democrazia, popolazione. Smalley può a buon diritto essere considerato uno dei padri delle nanotecnologie: nel 1985, assieme a Harold W. Kroto e a Robert F. Curl, ha scoperto il più famoso dei *cluster* atomici, il *fullerene* C₆₀ e, successivamente, numerose proprietà e applicazioni dei *nanotubi* di carbonio. Avendo avuto nel 2003 l'onore di pubblicare assieme a Smalley i risultati di una ricerca comune sui nanotubi, ho riletto con particolare emozione il testo del suo intervento, centrato soprattutto sulla correlazione materiali-energia. Una delle principali osservazioni di Smalley, oggi largamente condivisa e anticipata nel 2001 nell'*European White Book on Fundamental Research in Materials Science* (pubblicato a cura del Max Planck Institute für Metallforschung di Stuttgart), è che molti di questi problemi non potranno trovare una soluzione se nei prossimi decenni non saremo in grado di progettare e produrre nuovi materiali *tailor-made* con prestazioni sostanzialmente migliorate rispetto a quelle dei materiali attualmente utilizzati e, in qualche caso, con proprietà inedite sin qui solo immaginabili. Per i non addetti ai lavori, che nel corso della loro vita hanno assistito alla nascita e all'introduzione sul mercato di tanti nuovi straordinari materiali (Moplen, Kevlar, Teflon sono i nomi commerciali dei più noti al grande pubblico italiano) potrebbe sembrare un compito ovvio, a cui la scienza e la tecnologia assolveranno con certezza. A fronte di questa riconosciuta necessità permangono invece (o si elevano) difficoltà sia di principio e conoscenza sia di sistema. A quelle di sistema, in particolare in ambito nazionale, accennerò brevemente nella parte conclusiva di questo scritto. Per quanto riguarda il *knowledge gap* ricordo a titolo di esempio, nel campo dei materiali per l'energia, il caso della fusione termonucleare controllata che, in futuro, potrebbe fornire quantità pressoché illimitate di energia *pulita*. Ebbene, un materiale in grado di sopportare in modo completamente soddisfacente gli effetti distruttivi dell'instabilità del plasma e del bombardamento neutronico in un futuro impianto di produzione di energia a fusione oggi semplicemente non esiste e

la fisica e la chimica della materia note non sono in grado di suggerirne esattamente la natura. Il reattore sperimentale *ITER* (International Thermonuclear Experimental Reactor), la cui costruzione inizierà nel 2009 a Cadarache nel Sud della Francia da parte di un consorzio di Unione Europea, Russia, Cina, Giappone, USA, India e Corea del Sud con un costo stimato di 15 miliardi di euro, è stato progettato senza che questo *problema di materiali* sia stato risolto in modo definitivo. Eppure nel cuore del reattore *DEMO*, il cui primo funzionamento è previsto, dopo lo sperato successo di *ITER*, per gli anni 2030-2050, questo materiale X dovrà essere presente e durare per tutta la vita dell'impianto¹. Simili considerazioni si potrebbero fare a proposito dei nuovi catalizzatori per la dissociazione dell'acqua (*water splitting*) e dei nuovi materiali di stoccaggio che sarà necessario realizzare per abilitare la cosiddetta *società dell'idrogeno*, di cui molto si è parlato negli ultimi anni. In questo caso il problema cruciale è ottenere un decisivo aumento dell'efficienza e gli investimenti di ricerca richiesti sono decisamente minori.

Molti oggi ritengono che un significativo passo avanti verso la soluzione di questo e di altri problemi di scienza e ingegneria dei materiali potrà essere compiuto grazie alle *nanotecnologie* che trovano il loro fondamento ultimo nella proprietà fisiche della materia a livello atomico e immediatamente superiore. Le scale spazio-temporali del mondo atomico a cui sarà necessario operare sono molto lontane da quelle che ci sono familiari. L'*European White Book*, per esempio, prevede per il 2050 il controllo dei fenomeni che interessano i materiali alla scala del nanometro (un miliardesimo di metro) e del femtosecondo (un milionesimo di miliardesimo di secondo) e in condizioni estreme di esercizio. A questo traguardo si dovrebbe giungere realizzando sempre meglio strutture materiali così piccole da contenere al massimo qualche migliaio di atomi: le *nanostrutture*. A questa scala la reattività degli atomi sulla superficie e gli effetti del cosiddetto *confinamento quantico* conferiscono al materiale proprietà peculiari, non ottenibili diversamente. Le *nanostrutture* devono poi quasi sempre essere assemblate in gran numero per produrre effetti macroscopici utili. Questa impresa richiede lo sforzo congiunto di molteplici competenze, dalle *dure* scienze di base (le cosiddette *nanoscienze*), attraverso la più fenomenologica scienza dei materiali, sino ai vari settori dell'ingegneria e della medicina.

Il panorama che si apre è immenso e non può essere neppure delineato in un solo breve scritto. Ho quindi operato scelte drastiche, influenzate dalle mie esperienze dirette più recenti. Tratterò quindi brevemente di un passaggio cruciale sul cammino delle nanotecnologie (la capacità di *vedere* e *manipolare* singoli atomi), della nascita delle nanotecnologie, del possibile impatto di queste ultime sui materiali di oggi e di domani e concluderò con una succinta disamina dello stato della ricerca nazionale sui nuovi materiali, evidenziando le ombre e finendo con le luci.

Gli atomi e la loro immagine diretta

Da quando si è affermata la concezione della struttura discreta, atomica e molecolare della materia, nel campo dei materiali si è spesso usata un'analogia con il mondo delle costruzioni che tutti possono vedere: gli atomi e le molecole sono i *mattoni* (invisibili) con cui costruire i materiali utili per l'uomo. Oggi si concepiscono le *nanostrutture* come i nuovi mattoni (qualcuno usa il termine *superatomi*) con cui si possono e si potranno costruire i nuovi materiali e i nuovi dispositivi. Questo schema è intuitivo e utile, ma anche riduttivo. I mattoni sono inerti, hanno una forma ben definita e sono visibili a occhio nudo. Il tipo di muro che si può costruire assemblandoli è facilmente prevedibile. E gli atomi? Il carbonio, il più versatile tra gli elementi presenti nel catalogo di Mendeleev, può autoassemblarsi per costituire materiali con proprietà quasi antitetiche: la grafite, il diamante, i fullereni, i nanotubi. A giudicare dal risultato si potrebbe pensare, caso per caso, a

¹ E' in fase avanzata di progettazione IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), una macchina per lo studio degli effetti dell'irraggiamento neutronico sui materiali di un reattore a fusione. Il nuovo impianto, del costo di un miliardo di euro, potrebbe essere costruito in Giappone dallo stesso consorzio di ITER.

mattoni molto diversi e invece tutti questi materiali e *nanomateriali* sono fatti di carbonio e solo di carbonio. Un mattone ben strano, da cui dipende il tipo di vita presente sulla terra, la nostra vita.

Come abbiamo imparato a scuola, il concetto di atomo, e di struttura atomica della materia, è già presente nel pensiero di Democrito attorno al 460 a.C. Le sue idee, filtrate nel *De rerum natura* attraverso la filosofia epicurea, ci appaiono generalmente molto lontane da quelle attuali. In Lucrezio i *primordia rerum* (gli atomi) sono particelle elementari ciascuna delle quali è indivisibile ($\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$). Il nostro attuale concetto di atomo è quello di un complesso sistema dinamico della dimensione di un decimo di nanometro, composto da diversi tipi di particelle cariche e neutre. Particelle cariche negativamente, gli elettroni, *orbitano* attorno ad un nucleo centrale, circa centomila volte più piccolo dell'atomo, in cui è racchiusa quasi tutta la massa. Solo gli elettroni meno legati al nucleo partecipano ai complessi processi di attivazione (durante i quali l'atomo cambia letteralmente forma) che danno luogo allo stabilirsi del legame chimico tra atomo e atomo nella materia condensata. Tuttavia nell'opera di Lucrezio sono anche presenti alcune impressionanti intuizioni come quella riportata nella citazione che apre questo scritto, prefigurazione suggestiva degli orbitali elettronici in un cristallo, da cui dipendono appunto la *forma* degli atomi nella materia e le proprietà *macroscopiche* di questa che sfruttiamo nelle applicazioni. Atomisti sono stati Galileo, Newton e il padre della chimica moderna, Dalton, che riprese efficacemente l'idea di atomi di *forma diversa*, mattoni elementari con cui ogni cosa può essere costruita. Solo però a partire dal 1926 abbiamo dell'atomo un modello teorico quantitativo convincente, anche se di natura probabilistica, grazie all'equazione di Schrödinger, l'equazione fondamentale della meccanica quantistica, la nuova rivoluzionaria meccanica microscopica sviluppatasi nel primo quarto del XX secolo.

Malgrado l'idea concettuale della *fotografia* di un atomo, o meglio della *misura* della distribuzione statistica spaziale della sua carica elettronica, sia nata immediatamente assieme alla nuova meccanica, ancora negli ultimi anni 50 del secolo scorso scienziati di fama mondiale dubitavano del significato fisico di tale idea (nel 1953 persino lo stesso Erwin Schrödinger!) e alcuni, come il premio Nobel Percy W. Bridgman nel 1959, della stessa *esistenza reale* degli atomi. Bridgman sembra ignorare (o considerare non significativo) che già dal 1955, anno a cui risalgono le prime misure di Erwin W. Müller con il suo pionieristico *field ion microscope*, erano state ottenute alcune rozze e distorte immagini con risoluzione atomica. E' però soprattutto dal 1982, grazie all'invenzione del *microscopio a scansione a effetto tunnel*, che questi grandi scettici avrebbero potuto ricredersi e, penso, appassionarsi vedendo le prime immagini dirette, non distorte, degli atomi della superficie del silicio. *Vedere* gli atomi rappresenta anche il parziale superamento di una condizione di fatto che rendeva il mondo microscopico estremamente lontano dall'esperienza e dalla sensibilità comuni, comprensibile solo attraverso gli astratti e spesso anti-intuitivi concetti della nuova meccanica. Infatti, malgrado non solo la struttura dell'atomo, ma anche la struttura atomica della materia siano descritte in modo adeguato dalla fisica teorica a partire dagli anni 30 dello scorso secolo, ancora oggi la maggior parte dei dati sperimentali (tutti sino al 1955 e quasi tutti sino agli anni 1970/80) sono di natura *indiretta*, forniti soprattutto da misure di spettroscopia ottica e di diffrazione di raggi X, elettroni e neutroni.

Da circa vent'anni, in un crescendo di impressionanti progressi, il microscopio a scansione a effetto tunnel (STM), invenzione che valse il premio Nobel 1986 per la fisica a Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, consente di *vedere* singoli atomi e di *manipolarli*. Il principio di funzionamento del microscopio STM risiede in un effetto intrinsecamente quantistico, l'effetto tunnel appunto, che consente a una corrente elettronica di superare una barriera energetica che la fisica classica riterrebbe invalicabile. I microscopi a scansione di sonda (*scanning probe microscopes*) hanno già trovato numerose applicazioni nelle nanoscienze e nelle nanotecnologie. Per la sensibilità diretta agli stati elettronici, STM è diventato lo strumento di punta nella fisica delle superfici mentre, per la

maggior semplicità d'uso, l'applicabilità a qualunque tipo di campione e la possibilità di misurare forze e di funzionare anche in ambiente liquido, il *microscopio a forza atomica* (AFM), inventato subito dopo lo STM, è diventato lo strumento d'elezione per la topografia, le proprietà meccaniche delle superfici e la biologia. Va anche detto che non tutte le nuove *immagini dirette* sono in completo accordo con le previsioni teoriche sulla struttura elettronica delle molecole. Il dettaglio della struttura interna di un atomo singolo rimane ancora inaccessibile a un *imaging diretto* (il record attuale di risoluzione, ottenuto nel 2004 a Oak Ridge da Stephen J. Pennycook, è 0.06 nm essendo il raggio dell'atomo di idrogeno pari a 0.05 nm) e, in base alle conoscenze attuali, si sarebbe tentati di azzardare che continuerà a rimanere tale a lungo. Ma anche nelle scienze, si sa, non conviene fare previsioni. Fa comunque riflettere il fatto che l'immagine di un atomo ottenuta con il microscopio STM è una *fotografia* della distribuzione statistica dei suoi elettroni e che sulla dimensione di un singolo elettrone sappiamo così poco da poterlo considerare, a tutti gli effetti, una particella elementare puntiforme. Non dico altro su un tema che ci porterebbe troppo lontano, per esempio allo scopo per cui è stato costruito LHC (Large Hadron Collider), l'enorme acceleratore del CERN ora fermo per un guasto, e al fantomatico *bosone di Higgs* su cui ormai celiano anche i comici televisivi perché, al di fuori del gruppo esoterico dei fisici delle alte energie, *nessuno ci capisce niente*. Qui interessa ricordare che la nascita (convenzionale) delle nanotecnologie ha direttamente a che fare con una previsione di quasi cinquanta anni fa: prima o poi sarebbe stato possibile *vedere* individualmente gli atomi e anche *manipolarli*.

La nascita convenzionale delle nanotecnologie

Un altro premio Nobel, Richard Feynman, nel dicembre del 1959, nell'ormai storico seminario tenuto presso il Caltech *There's Plenty of Room at the Bottom - An Invitation to Enter a New Field of Physics*, afferma: "...dovrebbe essere possibile vedere individualmente gli atomi". A differenza di Bridgman, Feynman, spinto da inguaribile entusiastico ottimismo, ci azzecca, anche se *a posteriori*. Evidentemente non era noto a molti che Erwin W. Müller avesse già *visto* singoli atomi e pubblicato il risultato nel 1955! Feynman è invece vero profeta quando, nello stesso intervento, geniale e visionario, prevede anche la possibilità di *manipolare* singoli atomi: "*Non ho paura di affrontare la domanda finale cioè se alla fine, nel grande futuro che ci aspetta, saremo in grado di disporre gli atomi nel modo che vogliamo; proprio gli atomi, laggiù sul fondo! Che cosa accadrebbe se potessimo disporre gli atomi uno per uno come vogliamo? (ragionevolmente, s'intende; non potremo porli in posizioni in cui siano chimicamente instabili, per esempio).*" Feynman pensa di poter *scrivere* così, usando gli atomi come elementi grafici puntuali per costruire le lettere dell'alfabeto, "*l'intera enciclopedia britannica sulla capocchia di uno spillo*". Oggi sappiamo che quest'ultima operazione, concettualmente possibile, richiederebbe però la ragguardevole durata di circa 87000 anni! I ricercatori di IBM, più modestamente, sono stati i primi, circa vent'anni fa, a scrivere il logo della loro azienda usando una trentina di atomi di xeno su una superficie di nichel, tenuta a una temperatura prossima allo zero assoluto, in un tempo ragionevolmente breve. Chiunque abbia letto un lavoro introduttivo o ascoltato una conferenza sulle nanotecnologie avrà sicuramente ricevuto il messaggio: con "*There's Plenty of Room at the Bottom*" Feynman ha tenuto a battesimo le *nanotecnologie*, cioè questo "*new Field of Physics*". Feynman, essendo un fisico, ha privilegiato, ma solo nel titolo, la sua disciplina. Nel testo dell'intervento egli parla molto anche di applicazioni meccaniche, elettroniche, chimiche e biologiche, essendo anche qui buon profeta. Trascinato dall'ottimismo e, in qualche luogo, persino da candida ingenuità, Feynman mostra un radicale atteggiamento *riduzionistico*: "*Quali sono i problemi più centrali e fondamentali della biologia oggi? Sono domande come: qual'è la sequenza delle basi nel DNA? [...] Come sono sintetizzate le proteine? [...] Dove risiedono le proteine? Dove si introducono gli aminoacidi? Nella fotosintesi, dov'è la clorofilla; come è sistemata; dove sono i carotenoidi implicati in questa faccenda? Qual è il sistema di conversione della luce in energia chimica? E' molto facile rispondere a molte di queste fondamentali domande di biologia:*

semplicemente guardate l'oggetto!". La capacità di vedere gli atomi, guidata dalle previsioni teoriche della meccanica quantistica, *ridurrebbe* la biologia alla fisica fondamentale della struttura atomica e molecolare della materia. Come fisico, più prudentemente direi: può *riconducere*, se non si dimenticano aspetti di sistema che riguardano l'organismo vivente come un tutto. I biologi, tuttavia, sembrano oggi avere accolto, almeno nella sostanza, il messaggio di Feynman, che rincara la dose: "Nell'anno 2000, quando si guarderanno indietro considerando il nostro tempo, si domanderanno perché solo a partire dal 1960 qualcuno abbia cominciato a muoversi seriamente in questa direzione". Sospetto che i molti che hanno letto, o hanno sentito dire, che "There's Plenty of Room at the Bottom" segna la nascita delle nanotecnologie non abbiano effettivamente letto quelle dieci impegnative pagine e che, quindi, si stupirebbero nell'apprendere che Feynman dedica al più importante principio di base, su cui si fondano e attraverso cui si comprendono le principali applicazioni nanotecnologiche, solo le seguenti poche righe, nel paragrafo *Atoms in a small world*: "Quando entriamo nel piccolo, piccolissimo mondo –per esempio circuiti composti da sette atomi – abbiamo un sacco di cose nuove che possono accadere che rappresentano opportunità completamente inedite per il progetto. Gli atomi a questa piccola scala si comportano come nient'altro può comportarsi a una grande scala, perché essi obbediscono alle leggi della meccanica quantistica". Se si dovesse dire cosa sono le nanotecnologie adottando una definizione stretta, quasi puristica, si dovrebbe dare la seguente definizione: "le tecnologie che riguardano materiali e/o dispositivi e/o processi che si basano sul confinamento quantico". A questo punto la denominazione diventa stringente: all'interno di una struttura materiale che contiene circa un migliaio di atomi si manifestano fenomeni quantistici detti di *confinamento*. Feynman, riferendosi a un sistema unidimensionale, parlava di una decina di atomi: $10 \times 10 \times 10 = 1000$. Allo stato solido un cubetto che contiene 1000 atomi ha un lato dell'ordine del nanometro. Se il numero di atomi cresce, e il cubetto aumenta di dimensioni, normalmente questi effetti si attenuano sino a diventare rapidamente trascurabili. Il confinamento, governato in ultima analisi dal *principio di indeterminazione di Heisenberg*, è un concetto complesso, di non facile divulgazione². Le sue conseguenze sono potenzialmente rivoluzionarie. Avendo a disposizione atomi di un solo elemento, e riuscendo a costruire con essi una struttura nanometrica della *dimensione voluta*, si possono riprodurre alcune proprietà che una porzione macroscopica di materia possiede solo se composta da atomi diversi da quello considerato. Il progettista di un nuovo materiale, paragonato al pittore di un nuovo quadro, ha quindi a disposizione una tavolozza su cui, oltre a tutti gli elementi della tavola periodica, compare un colore in più: la *dimensione*. Se egli è in grado di controllare la dimensione, può, usando un solo altro colore (elemento) riprodurre molte proprietà di altri colori (altri elementi). Ciò è possibile perché, nell'intervallo di scala tra qualche nanometro e la dimensione di un singolo atomo (0,1 nanometri), le proprietà dipendono fortemente dalle dimensioni. Ecco che allora una particella metallica può diventare trasparente, una particella semiconduttrice può cambiare colore, un'altra può fondere a una temperatura decisamente inferiore a quella usuale, ecc. Il tutto senza cambiare la composizione chimica, ma solo agendo sulle dimensioni. In un'accezione meno stretta

² E' veramente arduo andare oltre la frase di Feynman senza entrare in tecnicismi immediatamente incomprensibili a chi non ha familiarità con la meccanica quantistica. Il diverso grado di confinamento degli elettroni nella materia è un fattore determinante di tutte le sue proprietà (eccetto quelle nucleari). Qui basti dire, rozzamente, che l'insieme dei livelli energetici (energie degli stati stazionari) di un atomo, in cui gli elettroni sono fortemente confinati, è discreto (di qui gli spettri ottici *a righe* degli atomi). L'insieme dei livelli energetici di una molecola, in cui gli elettroni sono meno confinati, è ancora discreto, ma i livelli sono fittamente raggruppati *in bande*. Nei solidi, in particolare nei cristalli, dove il confinamento elettronico attorno ai singoli atomi è modesto e gli elettroni possono muoversi in un volume macroscopico, il raggruppamento in bande è così fitto da potersi considerare *continuo*. Si distinguono così intervalli continui di energie *permesse* separati da intervalli di energie *proibite*. Se prendiamo un cubetto di silicio di dimensioni macroscopiche e, con un processo *top-down*, ne riduciamo progressivamente le dimensioni sino ad arrivare alla scala dei nanometri, l'insieme dei livelli energetici di questo piccolo *cluster* di atomi assomiglierà di più a quello di una molecola che a quello del cubetto macroscopico da cui siamo partiti. Dalla distribuzione dei livelli energetici e dalla loro occupazione da parte degli elettroni (secondo una distribuzione di probabilità determinata da *Enrico Fermi* e *Paul Dirac*) dipendono tutte le proprietà di quella *nanostruttura*: ottiche, meccaniche, termiche, elettriche, magnetiche, chimiche ecc.

(e, di fatto, accettata) tutto ciò che ha dimensioni inferiori al micron (un milionesimo di metro) può essere oggetto di nanotecnologie in quanto dotato di proprietà peculiari che non si manifestano a una scala superiore. E' cruciale l'elevato rapporto superficie/volume e la presenza di difetti superficiali (*dangling bonds*) che forniscono agli oggetti di queste dimensioni un'elevata reattività, anche quando gli effetti del confinamento quantico sono deboli.

Il termine *nanotecnologie* non fu coniato da Feynman: fu usato per la prima volta da Norio Taniguchi dell'università di Tokio nel 1974 per descrivere la fabbricazione di precisione di componenti materiali con tolleranze nanometriche. In modo apparentemente indipendente fu poi utilizzato da Eric Drexler del MIT nel suo libro del 1986 "*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*" per descrivere ciò che, in seguito, diventerà noto come *molecular nanotechnology*. Drexler supera Feynman in capacità visionaria, prefigurando *nano-robot* iniettabili in grado di riparare danni interni al corpo umano a livello molecolare. Queste e altre idee di Drexler, che ricordano un film di Richard Fleischer del 1966, soprattutto quelle relative alle future applicazioni in campo medico chirurgico, verranno fortemente criticate da Smalley, che solleverà nei loro confronti serie obiezioni di principio. Una polemica pubblica, non sempre garbata, nascerà tra i due scienziati. Dopo la categorica affermazione di Smalley "*i nanorobot meccanici autoreplicanti sono semplicemente impossibili in questo mondo*", in una lettera aperta a Smalley, Drexler scriverà: "*Uno scienziato la cui ricerca rispetto, ha osservato che "quando uno scienziato sostiene che qualcosa è possibile, probabilmente sottovaluta quanto tempo sarà necessario per realizzarlo. Ma se dice che è impossibile, ha probabilmente torto." Lo scienziato in questione è, naturalmente, Lei stesso*".

Negli ultimi vent'anni gli investimenti pubblici e privati nelle scienza e nell'ingegneria della *nanoscala* sono andati continuamente aumentando. Negli USA nel 1991 la National Science Foundation (NSF) lancia il suo primo programma esclusivamente legato alle nanotecnologie investendo circa sei milioni di dollari. Nel 1998 il governo americano organizza l'*Interagency Working Group on Nanotechnology (IWGN)*, il cui lavoro a livello federale conduce due anni dopo alla partenza della *multi-agency National Nanotechnology Initiative (NNI)*, finanziata con 270 milioni di dollari; il budget previsto (fonte governativa) per il 2009 è 1.5 miliardi di dollari a fronte di un dato certo 2007 di 1.425 miliardi di dollari. Sempre nel 2004 in un documento ufficiale della NSF si legge: "*Il nanometro (un miliardesimo di metro) è un punto magico nella scala dimensionale. Le nanostrutture sono alla confluenza tra i più piccoli dispositivi realizzati dall'uomo e le molecole più grandi presenti nei sistemi viventi . . . E' iniziata una rivoluzione nella scienza, nell'ingegneria e nella tecnologia; è basata sull'abilità di organizzare, caratterizzare e manipolare sistematicamente la materia alla nanoscala. Entro il XXI secolo si possono prevedere sviluppi che porteranno molto lontano sia nella conoscenza scientifica sia in un ampio spettro di tecnologie nella maggior parte delle attività produttive, nella medicina, nella conservazione dei materiali e nell'energia, nell'ambiente e nella formazione*". La produttività scientifica nel settore è cresciuta esponenzialmente. A partire dai primi anni 1990 il prefisso "nano" è apparso sempre più frequentemente nei titoli degli articoli scientifici e delle domande di finanziamento della ricerca. Se da un lato ciò dimostra l'opportunità degli scienziati che *rietichettano* attività di ricerca esistenti per fronteggiare la scarsità di finanziamento, dall'altro si tratta della prova dei primi successi concreti delle nanotecnologie e della crescente consapevolezza del loro valore strategico.

I materiali nano-strutturati del passato, del presente e del futuro

E' ben noto che nel passato si è fatto un uso inconsapevole di alcune micro e nanotecnologie. I vetri colorati delle cattedrali gotiche, per esempio, contengono nanoparticelle d'oro il cui colore dipende dalla dimensione. Oggi sotto l'ampio cappello delle nanotecnologie si colloca l'area di ricerca sui nuovi materiali nanostrutturati o *nano materiali*, come spesso si usa dire. In termini di numero delle

ricerche, mercato attuale e potenziale, si tratta del settore di maggiore importanza. Il mercato attuale è molto più popolato di prodotti nanotecnologici disponibili di quanto non si creda. Elenco, solo a titolo di esempio: paraurti per automobili, vernici e ricoprimenti anticorrosione, antigraffio e antinquinamento, film protettivi e antiriflesso per lenti di occhiali e vetri di automobili, utensili per il taglio dei metalli, creme solari e cosmetici, palle da tennis di lunga durata, racchette da tennis più leggere e robuste, tessuti antimacchia, adesivi odontoiatrici, cerotti medicati per ustioni e ferite, testine di stampanti a getto d'inchiostro, convertitori catalitici per automobili ecc. Tra i prodotti disponibili, a cui la ricerca nazionale ha dato un rilevante contributo, cito i diodi organici emettitori di luce (OLED) probabilmente destinati a sostituire le lampadine nei fari delle automobili. In alcuni di questi casi si può sospettare un'operazione di puro marketing. In altri è presente un reale vantaggio in termini di prestazioni e/o di costo.

In un rapporto statunitense del 2004 (Lux Research Report: *Sizing Nanotechnology's Value Chain*) il mercato mondiale di una categoria molto specifica di nanomateriali (nanotubi di carbonio, nanoparticelle e quantum dots, dendrimeri), era valutato per l'anno 2005 413 milioni di dollari e per il 2010 3.6 miliardi di dollari. Lo stesso rapporto prevede per il 2010, per l'intero settore delle nanotecnologie, una dimensione di mercato enormemente superiore, pari a di 1500 miliardi di dollari. A proposito di questo dato finale, altri rapporti più recenti, ma meno affidabili, danno letteralmente i numeri. Nel 2005 le applicazioni di tutti i materiali nanostrutturati erano distribuite come segue: 67,6% settore elettronico e optoelettronico; 19,7% settore biomedicale, farmaceutico e cosmetico; 12,7% settore energetico, della catalisi e strutturale.

Per quanto riguarda il futuro, il panorama è immenso. Per orientarsi occorre anzitutto introdurre una distinzione importante tra *evolutionary nanotechnologies* e *revolutionary nanotechnologies*. Nel primo caso si cerca di migliorare le prestazioni di prodotti esistenti rendendo sempre più piccoli i loro moduli strutturali e/o funzionali: è la filosofia *top-down* del *smaller, better, cheaper*, che sta contrassegnando in parte la transizione dalla microelettronica alla nanoelettronica. Nel secondo, è la filosofia del sogno di Feynman, si preconizza un'approccio *bottom-up* con cui nuovi materiali, nuovi dispositivi e nuovi sistemi vengono costruiti atomo per atomo, o nanostruttura per nano struttura (per esempio assemblando *foreste di nanotubi*). Fare il profeta riguardo alla creazione di classi radicalmente nuove di materiali avanzati che derivano da una ricerca multidisciplinare globalizzata è praticare un mestiere pericoloso. Certamente appare insensato stimarne il mercato, anche se qualcuno ci prova. Il rapporto dell'Institute for Prospective Technological Studies della Commissione Europea "The future of manufacturing in Europe 2015-2020" si limita ad affermare che: "*The materials of the future will be integrated where intelligence, multifunctionality and autonomy are designed at the smallest level*". In questa prospettiva il rapporto considera i nanomateriali come non legati a una particolare applicazione ma assolutamente pervasivi. Per quanto riguarda, per esempio, il settore energetico-ambientale si può dire che non farà eccezione alla regola generale: sarà necessario un approccio trasversale con competenze di fisica e chimica di base, scienza e ingegneria dei materiali, ingegneria energetica, nucleare, chimica, meccanica, elettrica, elettronica e ambientale. Al livello della ricerca di base, cruciale sarà la fusione sinergica delle nanotecnologie e della più matura scienza delle superfici. Le aree strategiche sono quelle del *light harvesting* (solare fotovoltaico e dissociazione dell'acqua), delle celle a combustibile, della fotocatalisi, della catalisi eterogenea e della catalisi degli enzimi, dello stoccaggio dell'idrogeno, per esempio mediante idruri metallici, dei materiali nanocristallini in genere.

Un concetto chiave del tutto generale sembra essere quello di *materiale integrato* (*integrated material*). La distinzione tra materiale strutturale e materiale funzionale è ormai evanescente. I polimeri, per esempio, possono ora condurre l'elettricità, emettere luce e cambiare forma sotto l'azione di un opportuno stimolo. Da qui ai *materiali intelligenti* il passo sarà breve? La sfida è ora incorporare *intelligenza* nel materiale in modo da renderlo capace di autodiagnosticarsi,

autoripararsi, autoorganizzarsi. Una sfida che richiederà una stretta collaborazione tra scienza dei materiali, sensoristica ed elettronica.

Un altro paradigma è l'imitazione della natura, realizzando i materiali cosiddetti *bioispirati*. Rientrano in questa categoria le nanoparticelle di ossidi di metalli di transizione incapsulate in proteine che, illuminate con luce visibile, possono catalizzare la riduzione di inquinanti ambientali come il cromo esavalente e i tentativi di riprodurre artificialmente nanostrutture naturali con eccezionali proprietà adesive o tribologiche. L'esempio della struttura nanometrica delle zampine del gecko, che ha recentemente ispirato la produzione di nastri superadesivi (sfruttando solo le deboli forze di van der Waals tra molecole) e di una supercolla (sfruttando le forze di van der Waals e l'interazione chimica derivante da una proteina presente nelle cozze), è il più citato e nessuna introduzione alle (o volgarizzazione delle) nanotecnologie che si rispetti può evitare di presentarlo.

La ricerca nazionale sui nuovi materiali: ombre e luci

In un momento che richiede l'ottimismo della volontà, capovolgo l'ordine tradizionale: inizio con le ombre per terminare con le luci.

Ombre. Cito anzitutto alcuni fatti significativi relativi all'interesse tardivo che la scienza dei materiali ha suscitato in Italia nel secolo scorso. Chi cercasse nella gloriosa Enciclopedia Italiana Treccani la voce "materiali" rimarrebbe fortemente sorpreso: la voce è presente nell'edizione originale del 1936 dove, in modo descrittivo, si tratta quasi esclusivamente dei materiali per l'edilizia, senza alcun riferimento alla relazione struttura-proprietà. Poi la voce scompare: non sarà più inclusa negli aggiornamenti successivi, compresa la IV appendice del 1978. Se poi il deluso lettore si rivolgesse all'Enciclopedia del Novecento degli anni 1975-1984, sette prestigiosi volumi che contengono fondamentali contributi monografici di alto livello, ancora nulla. Solo nell'ultimo volume di appendice, l'ottavo, aggiunto nel 1989 per colmare le lacune dell'opera, troverebbe finalmente la voce cercata. Una trattazione esauriente con uno stato dell'arte adeguato. Uno degli autori è Luigi Nicolais, esperto di polimeri di fama internazionale. L'apparente iniziale disinteresse dell'élite scientifica del paese trova riscontro anche nel mio settore disciplinare, la struttura della materia, il settore della fisica che sta alla base della scienza dei materiali e che contiene la fisica dello stato solido e la fisica dei materiali in genere. Faccio qui un solo esempio. Mentre in Inghilterra il primo libro di testo di fisica dei materiali *The theory of the properties of metals and alloys* di Mott e Jones esce nel 1936, dieci anni dopo l'introduzione dell'equazione di Schroedinger, in Italia i primi corsi di fisica dello stato solido vengono istituiti venticinque anni dopo, negli anni 1960. Inoltre ancora negli anni 1970, in linea con Bridgman, in Italia vi sono illustri esponenti dell'accademia convinti dell'inutilità dell'introduzione dell'insegnamento della struttura della materia nelle facoltà di ingegneria. Il primo corso di laurea in Ingegneria dei Materiali nasce a Trento nel 1986. Nel sistema nazionale della ricerca si evidenzia un'eccessiva frammentazione con alti steccati (sino a tempi recenti) tra diverse discipline e diverse comunità scientifiche, tra l'accademia e l'industria, salvo lodevoli eccezioni. Vi è poi stata sinora una insufficiente consapevolezza del ruolo strategico dei materiali: tra i comuni cittadini, in particolare i giovani, e tra i *policy makers*. Non è un problema solo nostro: l'Inghilterra ha lanciato recentemente una capillare campagna nazionale di sensibilizzazione sulla scienza dei materiali. La scienza dei materiali, assieme ad altre scienze *dure* quali la fisica e la chimica, mediamente attira poco i giovani, già genericamente scoraggiati dall'incertezza della carriera di ricercatore. Con l'eccezione dei paesi asiatici emergenti, il settore è afflitto da un inadeguato finanziamento della ricerca (soprattutto quella di base). Quest'ultimo fattore penalizza l'Europa e, in particolare, l'Italia: nel 2004, secondo dati ufficiali della Commissione Europea, la spesa pubblica pro capite per la ricerca nel settore delle nanotecnologie è stata un terzo di quella della Germania, mentre quella totale è stata inferiore a un quarto. Il sistema della ricerca del nostro paese è stato (e in parte ancora è)

specialmente carente nel settore della sintesi, del *processing* e dell'integrazione dei nuovi materiali nei dispositivi o nei manufatti. I centri di ricerca in grado di operare a tutto campo (dal progetto di un nuovo materiale alla sua sintesi e alla realizzazione e caratterizzazione di dispositivi prototipo che ne sfruttino le peculiari proprietà) si contavano sino a pochi anni fa sulle dita di una sola mano. Ciò è stato soprattutto vero per il sistema universitario nazionale, anche se confrontato solamente con il corrispondente sistema europeo. D'altra parte singole importanti esperienze che hanno operato con successo nel passato, realizzando anche una fertile collaborazione università-imprese, o non esistono più (come il CISE a Milano) o sono state fortemente ridimensionate (come il CSM a Roma). La capacità di *dimostrare* il ruolo del materiale nel prodotto finale è essenziale: altrimenti la funzione della scienza dei materiali, che per definizione opera nel *background*, rimane invisibile o, comunque, sottovalutata.

Luci. Gli ultimi dieci anni hanno registrato una serie di interventi mirati che hanno agito positivamente su alcune debolezze di sistema. Esiste oggi un buon numero di laboratori nazionali (del CNR e del CNR-INFN), distribuiti nel paese, che godono di elevata reputazione internazionale e posseggono *facilities* sperimentali di tutto rispetto. In molti di questi laboratori si opera in un contesto interdisciplinare ed esiste la capacità non solo di produrre nuovi materiali, ma di realizzare con essi dispositivi prototipo. Anche la ricerca universitaria è strutturalmente migliorata grazie sia al coordinamento operato da consorzi come INSTM (Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali) e CNISM (Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze Fisiche della Materia) sia alla nascita nel 2003 di cinque nuovi Centri di Eccellenza accreditati dal MIUR presso cinque università, tra cui il Politecnico di Milano. Questi ultimi centri operano tutti nel settore delle nanotecnologie (in particolare delle superfici e dei materiali nanostrutturati). Anche grazie alla nascita dei nuovi laboratori del centro di eccellenza e alla loro attività coordinata, la ricerca dei dipartimenti del Politecnico di Milano che operano nel settore delle nanotecnologie e, in particolare, dei nanomateriali, si è molto rafforzata e ha raggiunto risultati di tutto rispetto, come ha recentemente confermato una valutazione internazionale.

Conclusioni

L'analisi del contesto attuale induce a ritenere ancora stimolanti e valide alcune tesi del già citato *European White Book on Fundamental Research in Materials Science*. Secondo l'*European White Book*, per quanto riguarda la visione, il finanziamento pubblico deve privilegiare una *revolutionary* research, basata soprattutto sulle università e gli istituti di ricerca, rispetto a una *evolutionary* research. Mi domando quanto questa autorevole raccomandazione si sia tradotta nell'effettiva struttura del finanziamento pubblico europeo, nazionale e regionale. Per quanto riguarda il metodo, come ho più volte ripetuto in questo scritto, tutti invocano una maggiore interdisciplinarietà. Come si possa ottenere questo risultato in un mondo sempre più complesso salvaguardando il mantenimento di forti competenze disciplinari specifiche dovrà essere oggetto di uno studio approfondito: non esistono soluzioni *facili*. Per quanto riguarda gli strumenti che dovrebbero rafforzare il tessuto ricerca pubblica-ricerca privata, andrebbero rifondati in Europa i laboratori di ricerca congiunti Università-Imprese (quali negli USA sono stati i gloriosi esempi di IBM, AT&T, Dupont, Corning e EXXON). Il rapporto del Max Planck non affronta i motivi strutturali della crisi storica di queste iniziative. Non si possono puramente e semplicemente riproporre gli stessi modelli in un contesto economico globale radicalmente mutato o in aree dove il numero di grandi imprese, come sono tutte quelle sopra citate, è esiguo. Voglio però sottolineare che dal terreno ibrido e fecondo che si è potuto realizzare in laboratori di questo tipo sono nate molte fondamentali invenzioni, tra cui quella che ci permette oggi di vedere e manipolare gli atomi.

E l'*evolutionary* research? E' ovvio che l'università si debba occupare anche di una ricerca mirante a migliorare le prestazioni e a diminuire il costo di produzione e l'impatto ambientale dei materiali

esistenti. A questa conclusione inducono non solo un sano realismo, e un sincero spirito di servizio nei confronti del contesto economico e sociale in cui si è inseriti, ma anche la consapevolezza che la distinzione tra *evolutionary* research e *revolutionary* research è utile ma troppo schematica. Bisogna inoltre fare i conti con le limitate risorse esistenti che richiedono, e richiederanno sempre più, scelte anche dolorose. Sino a che punto? Certamente un'università che non considerasse più la *revolutionary* research, la ricerca *blue sky*, come la sua missione principale (assieme alla formazione) rinnegherebbe la sua storia condannandosi a una rapida decadenza.

Riassumendo. Per la scienza dei materiali la priorità n. 1 risulta comunque essere la scoperta e il progetto di nuovi materiali e, tra questi, (priorità n. 2) i materiali speciali ad alto potenziale di innovazione, quali i materiali intelligenti (*smart and self repairing* materials), i biomateriali, i nanomateriali e i materiali per le sorgenti alternative di energia. Per il 2050 si prevede il controllo dei fenomeni che interessano i materiali alla scala dei nanometri e dei femtosecondi e in condizioni estreme di esercizio. Al raggiungimento di questo traguardo contribuiranno le nanotecnologie mediante le quali si ottengono nuove proprietà agendo sulle dimensioni e la dimensionalità, sfruttando l'estrema reattività delle superfici e i sorprendenti effetti del confinamento quantico che regolano il comportamento degli atomi laggiù *sul fondo* dove i nostri occhi, come del resto lassù *in alto*, direttamente non possono vedere.