

NANOSCIENZE E NANOTECNOLOGIE

SFIDE E OPPORTUNITÀ PER IL XXI SECOLO

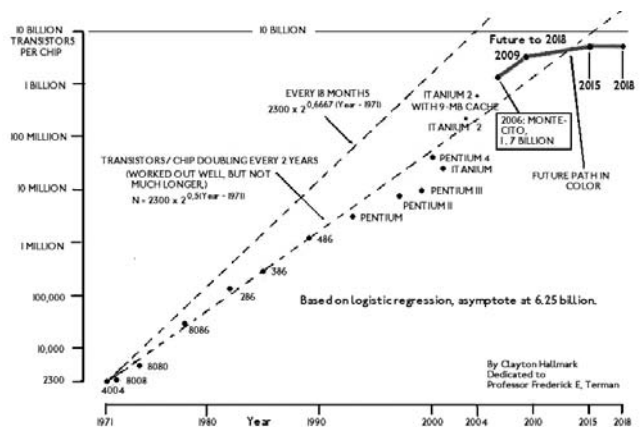
di Dario Narducci*

Una delle più importanti scoperte in campo scientifico e tecnologico di questi tempi, anche per le possibili ricadute sulla vita di tutti i giorni. L'autore presenta gli aspetti innovativi sul piano metodologico e concettuale che differenziano le nonoscienze e le nanotecnologie dalla ormai consolidata strategia di ricerca della microelettronica. Un contributo utile anche dal punto di vista dell'orientamento per coloro che si avviano a studi universitari di carattere scientifico.

Nessuna tecnologia nell'intera storia dell'umanità ha saputo svilupparsi con l'incredibile velocità con cui si è mossa la microelettronica. A partire dai primi anni Cinquanta del XX secolo il rateo di riduzione della taglia dei dispositivi microelettronici è riuscito a impressionare a tal punto anche gli addetti ai lavori che Gordon Moore, tecnologo americano cofondatore di *Intel*, ipotizzò nel 1965 una legge di sviluppo nel settore che, fino a oggi, non è mai stata smentita. Le legge di Moore prevede che le dimensioni dei dispositivi elettronici elementari si dimezzino ogni 18 mesi. Questa linea di tendenza, predetta all'inizio degli anni Sessanta, è stata puntualmente rispettata fino ai nostri giorni. Ma l'estrapolazione della retta di Moore prevede anche che, dal punto di vista delle dimensioni dei dispositivi, dimezzando ogni 18 mesi la regola di disegno, la microelettronica comincerà presto a ragionare sulla scala degli atomi. Questo implica che da un lato la tecnologia è prossima a toccare il limite dell'infinitamente piccolo; dall'altro che qualcosa dovrà rapidamente cambiare nel modo di pensare il funzionamento della microelettronica. Se, infatti, il comportamento fisico di un dispositivo non varia significativamente passando da dimensioni millimetriche alla scala del micron (10^{-6} m), la fisica

*Docente di Chimica Fisica presso il Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università degli Studi di Milano Bicocca.

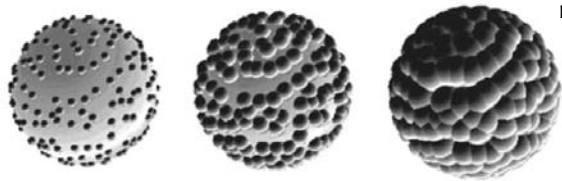
Una rappresentazione grafica della legge di Moore



predice che su scale più piccole il comportamento dei dispositivi muterà completamente. Non sarà più possibile pensare a elettroni che si muovono come palline cariche sottoposte a campi elettrici. Al contrario, il loro comportamento sarà governato e descrivibile soltanto impiegando leggi ed equazioni che appartengono alla meccanica quantistica. E, da molti punti di vista, la materia comincerà a comportarsi in maniera non intuitiva, diversa dalle aspettative che derivano dall'osservazione di sistemi macroscopici. Nanoscienze e nanotecnologie nascono da questo snodo concettuale.

Forse il primo esempio di nanotecnologie nella storia dell'umanità risale al XIII secolo, ed è opera dei maestri vetrai tedeschi che lavoravano alla realizzazione delle cattedrali gotiche. È noto da tempo agli storici dell'arte come, diversamente che in altre scuole vetraie dell'epoca, in Germania vi fosse la tradizione di impartire colorazioni ai vetri non impiegando sali minerali ma disperdendo nel vetro piccole quantità di oro. L'oro, come noto, è un metallo essenzialmente inerte; non si ossida, difficilmente reagisce per via chimica, e quindi non dà luogo a composti che possano giustificare i colori che le vetrate gotiche potevano assumere. Un mistero, quindi, come fosse stato possibile realizzare vetrate dai colori vividi e variegati quali quelle che adornano le chiese di mezza Europa. Un mistero che la scienza si è trascinata con sé fino ad anni recenti. Non più di dieci anni fa, alla *Rice University* fu condotto il seguente esperimento. Un sale d'oro fu precipitato da una soluzione acquosa in condizioni particolari, ottenendo una polvere di oro estremamente fine, con particelle la cui taglia è dell'ordine di qualche nanometro, e che possono essere fatte depositare su sferette di silice vetrosa del diametro di un decimo di micron. Queste «nanoconchiglie» d'oro su vetro impartiscono alla soluzione una colorazione: a seconda delle dimensioni delle particelle d'oro si ottengono «soluzioni» colorate dal rosso fino al blu. Non si tratta, evidentemente, di una proprietà dell'oro: fenomeni simili sono infatti ottenibili con qualunque metallo. Ciò che determina il colore delle polveri è solo la loro taglia. Il fenomeno è osservabile solo se questa taglia è nanometrica. I maestri vetrai tedeschi, in modo del tutto empirico, avevano imparato a trattare i vetri nei quali avevano disperso oro metallico in modo tale da ottenere particelle la cui taglia fosse appunto di qualche nanometro. La materia, quando ridotta a una taglia sufficientemente piccola, acquisisce proprietà fisiche e chimiche del tutto

Formazione graduale di una «nanoconchiglia» di oro su una sfera micrometrica di silice; lo strato di oro impartisce una colorazione al liquido in cui le «nanoconchiglie» sono disperse che dipende dalla taglia delle nanoparticelle d'oro



nuove: l'oro che, nella sua forma massiva, è un metallo giallo, se trasformato in nanoparticelle si comporta come un aggregato di atomi le cui proprietà sono principalmente determinate dalle dimensioni delle particelle stesse.

Non solo le proprietà fisiche, ma anche quelle chimiche, dipendono fortemente dalla

taglia: sempre l'oro, che è un pessimo catalizzatore su scala macroscopica, diventa un eccezionale catalizzatore quando disponibile come cristalli nanometrici.

Anche i dispositivi microelettronici e i materiali con i quali essi sono costruiti cambiano drasticamente le loro caratteristiche su una scala nanometrica. Un transistor tradizionale non funziona più se le sue parti hanno dimensioni di pochi nanometri. Ma risulta possibile immaginare un nuovo dispositivo in grado di controllare e amplificare le correnti che operi correttamente su questa scala e che, invece, ovviamente, non funzionerebbe se fosse costruito con dimensioni di qualche micron. Per esempio, una cella fotovoltaica realizzata in silicio ha un rendimento limitato se prodotta con grani di silicio macroscopici (il silicio non è un materiale ideale per convertire radiazione luminosa in energia elettrica); tuttavia nanocristalli di silicio sono ottimi candidati per la realizzazione di sistemi di fotoconversione ad alto rendimento.

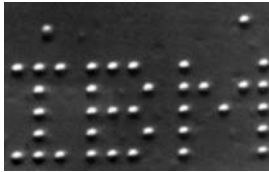
Top-down

Le metodologie che consentono di ottenere nanosistemi sono due. Una prima possibilità è quella di estendere ed estremizzare le metodiche che sono alla base della microelettronica fino a raggiungere la scala nanometrica. A questo approccio che, muovendo dall'alto (mondo macroscopico) verso il basso (mondo microscopico), viene definito *top-down*, si giustappone un diverso approccio che tende a realizzare strutture nanometriche a partire da unità più piccole delle nanofasi che si vogliono realizzare, cioè atomi o molecole. L'approccio *bottom-up* mira a sviluppare quindi nanostrutture attraverso la auto-organizzazione spontanea di atomi o molecole.

L'approccio *top-down* incontra molti ostacoli tecnici ma pochi ostacoli concettuali. Oggi la scala di miniaturizzazione della microelettronica è dell'ordine dei 50 nanometri. La procedura che viene impiegata per realizzare dispositivi planari di questa taglia è ancora, in linea di principio, la stessa correntemente impiegata in microelettronica. In questa procedura, detta fotolitografia, come nel processo di stampa fotografico, si impiega radiazione elettromagnetica per impressionare selettivamente un materiale fotosensibile che possa essere impiegato per delimitare regioni predefinite su una superficie. Perché questo processo vada a buon fine è necessario utilizzare radiazioni elettromagnetiche le cui caratteristiche siano compatibili con la risoluzione richiesta. Man mano che la miniaturizzazione dei circuiti è andata progredendo, le radiazioni impiegate si sono spostate verso la regione delle basse lunghezze d'onda, dato che la risoluzione ottenibile è limitata dai fenomeni di diffrazione. Per poter operare su scale dell'ordine di qualche nanometro occorre abbando-

nare l'impiego di radiazione elettromagnetica e rivolgersi verso sorgenti di elettroni. L'impiego di elettroni è assai meno agevole che non quello di radiazione elettromagnetica, dato che risulta necessario realizzare l'intero processo nanolitografico sotto alto vuoto. Anche nella scelta dei *resist* le richieste sono a tal punto pressanti da costringere a considerare non più materiali polimerici ma fasi inorganiche di alta qualità cristallografica. Alternativamente, è possibile utilizzare direttamente gli elettroni per «scolpire» direttamente la superficie.

La nanolitografia non è tuttavia l'unica possibile strategia *top-down*. Un approccio concorrente consiste nelle cosiddette procedure di nanomanipolazione, in cui singoli atomi vengono portati sulla superficie nelle posizioni volute e qui agganciati alla superficie stessa impiegando stili con punte di dimensioni atomiche. Se la punta dello stilo viene avvicinata opportunamente a un atomo, l'atomo aderisce allo stilo stesso. Dopo averlo posizionato, stilo e atomo vengono schiacciati sulla superficie, e l'atomo rimane agganciato alla superficie liberandosi del suo legame originario con lo stilo. Con questo tipo di tecnica negli anni Novanta fu possibile disegnare sulla superficie di un metallo quello che passò alla storia come «il logo più piccolo del mondo»: una trentina di atomi di argon che tracciavano sulla superficie di un cristallo di nichel l'acronimo IBM.



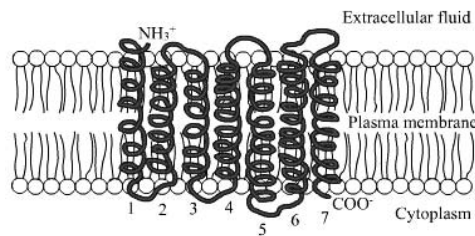
Il più piccolo logo del mondo, realizzato nel 1990 con 35 atomi di argon nanoposizionati su una superficie di nichel

Che la strada seguita sia quella nanolitografica o che si operi utilizzando una strategia di nanomanipolazione, il risultato che si consegue è la realizzazione di strutture di dimensione nanometriche, caratterizzate da un posizionamento spaziale definito *a priori* e riproducibili in maniera arbitraria. Molti autori considerano queste tre condizioni come necessarie per qualificare una metodica di preparazione come nanotecnologica: non è infatti sufficiente che una procedura generi strutture con una taglia dell'ordine o inferiore alla decina di nanometri perché si possa parlare correttamente di nanostrutture; è anche richiesto, ed è essenziale, che la collocazione nello spazio di queste nanostrutture sia controllata e, per l'appunto, ripetibile. È quanto viene comunemente richiesto in microelettronica: è essenziale che la reciproca disposizione dei componenti elettronici su di una superficie sia progettabile in quanto controllabile. Identico criterio vale su scala nanometrica: la logica resta quella di poter controllare la mutua disposizione dei nanocomponenti al fine di poter poi procedere a una connessione tra essi che renda realizzabili circuiti in grado di compiere operazioni logiche e/o aritmetiche. Uno dei vantaggi dell'approccio *top-down* consiste nel fatto che, trattandosi di una metodologia concettualmente identica a quella impiegata nella microelettronica, essa garantisce non solo la possibilità di realizzare interconnessioni tra i nanodispositivi ma anche (e non è affatto banale) connessioni tra i nanodispositivi e il mondo macroscopico.

Bottom up: il LEGO® molecolare

Quando ragioniamo di infinitamente piccolo può sembrare che le dimensioni degli organismi viventi e dei loro elementi fondamentali rimangano su una scala lontana e, curiosamente, macroscopica. Batteri e cellule sono decisamente più grandi di qualche decina di nanometri. Tuttavia, l'organizzazione biologica della materia vivente è non solo un ottimo esempio ma anche una straordinaria fonte di suggestioni nello sviluppo e nella progettazione di nanodispositivi. Correntemente, molta ricerca nel settore delle nanotecnologie prende spunto dall'analisi dei processi di auto-organizzazione della materia biologica. Qualsiasi organismo vivente, dai più semplici microrganismi all'uomo, è costituito in gran parte di acqua e in percentuali decisamente inferiori di una varietà di molecole organiche. Molte di queste molecole possono oggi essere sintetizzate in laboratorio. Tuttavia, esiste una profonda differenza tra un reagentario pieno di composti biochimici e un organismo vivente: quello che fa la differenza è che, *in vivo*, le molecole interagiscono fra di loro. Proteine, enzimi, aminoacidi, lipidi concorrono tutti insieme a costituire strutture complesse come le cellule, che sono un esempio affascinante di auto-organizzazione spontanea di materiale molecolare. Per esempio, le membrane cellulari costituiscono una barriera selettiva al passaggio di ioni grazie alla loro organizzazione micellare: molecole simili, tutte caratterizzate da una testa polare e da una coda apolare, si dispongono a formare uno strato che espone verso il mezzo acquoso le teste polari rivolgendosi al contempo verso l'interno le code apolari.

Questa barriera molecolare può essere resa ulteriormente flessibile e «intelligente» dalla presenza di proteine che intersecano la parete stessa, agendo da porte per il passaggio di speci-



fiche specie chimiche: sotto opportune condizioni le proteine si comportano come un tubo schiacciato, impedendo la permeazione della parete cellulare; mentre sotto altre condizioni il tubo si apre regolando la diffusione, per esempio, di ioni Ca^{2+} . Lo stimolo che determina l'apertura o meno delle porte proteiche è a sua volta uno stimolo chimico: una particolare molecola può insinuarsi nel tubo proteico modificando la conformazione della proteina-porta e quindi determinandone l'apertura.

Complessivamente, quindi, sia sul piano strutturale sia sul piano funzionale, tutto il meccanismo di funzionamento della materia biologica si fonda su un complesso interscambio di forze attrattive e repulsive tra

Struttura di una membrana cellulare

La struttura proteica inserita nella barriera micellare consente o impedisce la permeazione della parete cellulare a seconda della mutua conformazione delle catene polipeptidiche. Tale conformazione è a sua volta regolata dalle interazioni supramolecolari con la proteina e le specie chimiche presenti in prossimità della cellula stessa.

single molecole. Pertanto, a dispetto delle dimensioni apparentemente molto superiori delle cellule e dei batteri, la dinamica dei processi biologici è, a piena ragione, nanotecnologica. Esso soddisfa infatti i tre requisiti che sono sufficienti per parlare a pieno titolo di nanotecnologie: ordinamento, riproducibilità, dimensioni nanometriche (in questo caso, molecolari). Ed è questo uno dei punti da cui trae ispirazione l'idea di sviluppare nanotecnologie a partire da atomi e molecole cui viene insegnato a organizzarsi in maniera spontanea. È la filosofia dell'approccio *bottom-up*.

È infatti legittimo chiedersi se sia possibile generare strutture elementari di dimensioni nanometriche (molecole o loro piccoli aggregati) *in vitro* individuando al contempo condizioni ambientali (temperatura, intorno chimico, pressione, eccetera) tali da favorire l'attivazione di processi di spontanea organizzazione.

Un esempio può chiarire meglio il concetto. Se vogliamo costruire una ruota nanometrica, questa potrebbe essere una molecola di forma toroidale mentre il perno della ruota potrebbe essere un'altra molecola la cui struttura ricordi un pilastro. Il problema, su scala nanometrica, è quello di fissare la ruota al perno: non ci interessa bloccare la ruota sul perno quanto consentire alla ruota (toroide) di ruotare sul proprio asse restando tuttavia vincolata attorno al proprio perno. Su scala molecolare forze in grado di trattenere il toroide intorno al proprio perno consentendogli al contempo di ruotare sono tipicamente le interazioni di non-legame come i legami a idrogeno o le cosiddette forze di Van der Waals. I rotaxani sono molecole organiche effettivamente sintetizzate, con una struttura toroidale, che possono essere incernierate in modo da realizzare nanovolani. Molte altre molecole in grado di espletare elementari funzioni meccaniche sono state effettivamente sintetizzate: i rotaxani possono per esempio essere resi carichi elettricamente e, in presenza di opportuni campi elettrici, sono in grado di salire e scendere lungo molecole-pilastro come dei nanoascensori. Questo dimostra che è possibile progettare la complessità su scala nanometrica a partire da elementi semplici e più piccoli che siano in grado di interagire tra di loro sviluppando per via cooperativa capacità funzionali.

Un esempio di nanotecnologie di questo tipo viene dal settore dei nanocompositi. È noto come materiali tradizionali quali gomme e plastiche possano modificare in maniera estremamente rilevante le loro proprietà se al loro interno vengono dispersi piccoli quantitativi di altre fasi nella forma di aggregati nanometrici. In questo caso le interazioni che entrano in gioco sono quelle fra i nanoaggregati e le catene polimeriche. Negli pneumatici tradizionali molte delle proprietà più importanti (adesione all'asfalto, proprietà elastiche e plastiche, resistenza all'usura, eccetera) sono dovute alle cosiddette «cariche», cioè a piccole quantità di sostanze inorganiche che vengono aggiunte alla miscela polimerica in fase di realizzazione dello pneumatico stesso. È

scoperta recente come, senza modificare la natura chimica delle «cariche», una semplice riduzione della taglia dei microaggregati inorganici porti a variazioni enormi del comportamento degli pneumatici. Dispersioni di sostanze inorganiche in materiali polimerici prendono il nome di nanocompositi. Gli pneumatici basati sull'impiego di queste particolari mescole sono uno dei primissimi esempi di nanotecnologie arrivate sul mercato. Soprattutto nel settore degli pneumatici da competizione l'uso di nanocompositi è diventata pratica ordinaria per molte delle maggiori aziende produttrici. Il risultato è tipicamente quello di realizzare mescole in grado di sostenere condizioni ambientali e di uso proibitive per pneumatici convenzionali. Il meccanismo microscopico di funzionamento di questi nanocomposti è legato alle interazioni che si realizzano tra gli atomi alla superficie delle nanofasi inorganiche e la matrice polimerica. Si tratta, in linea di principio, delle stesse forze che entrano in gioco nelle dispersioni macroscopiche; tuttavia, l'estensione (e quindi l'intensità complessiva) delle forze risulta enormemente amplificata dalle piccole dimensioni delle particelle.

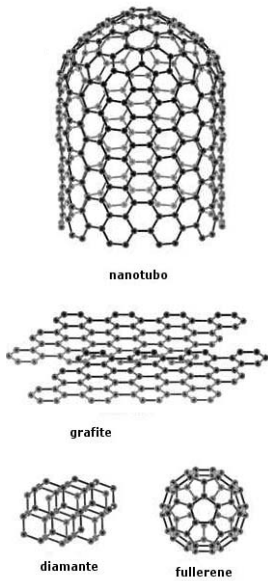
Connettività e ordine

Può sorgere il ragionevole dubbio che le possibili reali applicazioni delle nanotecnologie *bottom-up* riguardino soltanto i materiali strutturali, cioè quei materiali che vengono progettati e impiegati in virtù delle loro proprietà meccaniche. Quanto visto parlando di nanotecnologie *top-down* circa la possibilità di realizzare dispositivi nanoelettronici sembra nascosto sullo sfondo di un futuro possibile ma remoto. E così in realtà è, in parte. Mentre infatti le tecnologie *top-down*, pur con le loro difficoltà di implementazione, sono immediatamente pronte per essere inserite e utilizzate in microelettronica, nel caso delle tecnologie *bottom-up* attualmente paghiamo il costo di un ritardo in gran parte legato al «problema della connettività». Qualunque dispositivo elettronico deve infatti poter non soltanto dialogare al proprio interno, scambiando informazioni tra una parte e l'altra del dispositivo e poi, più complessivamente, tra dispositivo e dispositivo nel circuito; ma deve anche essere in grado di comunicare con il mondo esterno, cioè, in prospettiva, con l'utilizzatore ultimo. Tali connessioni risultano facilmente realizzabili sulla opportuna scala operando con un approccio *top-down* mentre sono molto più difficili anche solo da immaginare quando si operi a partire dalla scala atomica o molecolare. Occorre inoltre riuscire a pensare come progettare dispositivi in modo «ordinato», qualunque sia il significato esatto di questa parola.

Un importante passo in avanti nella direzione del superamento, almeno parziale, di questo problema è stata la scoperta dei fullereni e, successivamente, dei nanotubi. Nel 1985 Harold Kroto, Richard Smalley

Il primo circuito integrato fu realizzato impiegando germanio e conteneva un solo transistor bipolare. Le sue dimensioni erano di circa $1 \times 1,5$ mm.





Forme allotropiche del carbonio

e Robert Curl scoprirono che il carbonio, oltre a dar luogo a due fasi cristalline note (diamante e grafite), poteva andare a costituire una nuova fase in cui gli atomi di carbonio si dispongono a formare una struttura chiusa tridimensionale. Questi aggregati di carbonio, detti fullereni, costituiscono i capostipiti di una nuova famiglia di solidi che hanno aperto interessanti prospettive sia teoriche sia applicative nel campo nanotecnologico. È infatti anche possibile disporre esagoni di carbonio in modo da formare un foglio grafite, arrotolarlo su se stesso come un cilindro e chiuderlo alle estremità usando un fullerene tagliato in due. Si ottiene così una capsula, la cui lunghezza può essere grande a piacere, detta «nanotubo». I nanotubi sono potenziali candidati come nanofili in circuiti costruiti con approccio *bottom-up*. Un nanotubo è infatti una molecola, anche se un po' *sui generis*. Quindi non stupisce che molti ritengano che essi potrebbero costituire l'anello mancante nel collegamento circuitale in dispositivi progettati su scala molecolare. Questo risolverebbe una parte del problema, cioè quello delle interconnessioni. Il salto poi dal mondo nanometrico a quello macroscopico potrebbe essere compiuto passando attraverso la scala micrometrica. Se questa sarà la strada, i nanotubi o altre strutture simili costituiranno quindi il ponte necessario per guardare le rapide dimensioni dal mondo degli atomi a quello macroscopico.

Strutture quantiche

Un discorso a parte nell'ambito delle nanotecnologie *bottom-up* meritano le cosiddette strutture quantiche confinate. Si tratta di particolari fasi nanocristalline tipicamente costituite da materiali semiconduttori in cui la forma dei nanocristalli assume un ruolo fondamentale. Con particolari tecniche di preparazione risulta possibile generare strutture che, in prima approssimazione, possono essere considerate bidimensionali oppure monodimensionali oppure zero-dimensionali. Per esempio, se viene realizzato un nanocristallo in cui due dimensioni (diciamo altezza e larghezza) sono micrometriche e la terza dimensione (lunghezza) è invece nanometrica, il nanocristallo si comporta come se fosse un sistema bidimensionale, cioè come se fosse un piano, denominato «strato quantico».

Analogamente, se a essere nanometriche sono due dimensioni e una risulta invece micrometrica si parla di «linee quantiche». Infine, oggetti in cui tutte e tre le dimensioni sono nanometriche sono detti «punti quantici». Come è intuibile dai nomi, un'analisi dei fenomeni fisici che regolano il comportamento elettronico di queste strutture richiede necessariamente l'utilizzo di strumenti di meccanica quantistica. Senza entrare nel dettaglio si può tuttavia affermare che il fatto che in una o più direzioni queste strutture risultino di dimensio-

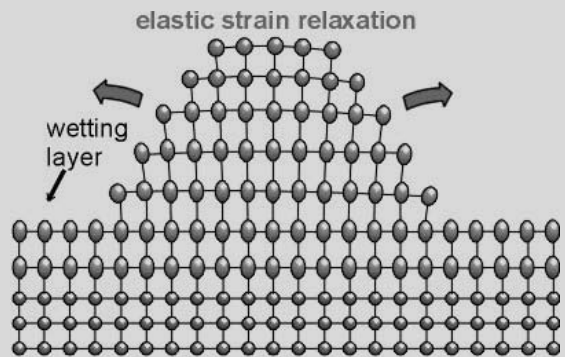
ni nanometriche, scala tipica dei fenomeni quantistici, rende il comportamento delle strutture stesse piuttosto peculiare. Punti quantici sono per esempio in grado di emettere luce caratterizzata da colori che dipendono unicamente dalla taglia del punto quantico stesso. Ciò consente applicazioni estremamente interessanti non solo in elettronica ma anche in optoelettronica, dove la possibilità di convertire segnali elettrici in segnali ottici e viceversa consente di immaginare lo sviluppo di dispositivi di calcolo che utilizzino, almeno parzialmente, la luce come vettore di informazione. I computer ottici sarebbero caratterizzati da velocità di calcolo straordinariamente superiori a quelle dei correnti computer elettronici. Ma anche in altri settori la possibilità di disporre di sorgenti luminose miniaturizzabili a piacere e in grado di emettere radiazioni di qualsivoglia colore costituisce un vantaggio notevole.

La realizzazione di strutture quantiche confinate è un esempio particolare di tecnologie che utilizzano la spontanea tendenza degli atomi ad auto-organizzarsi (si veda il riquadro che segue). In questo caso non si gioca tanto su interazioni dirette tra singoli atomi come nel caso molecolare: ciò che viene sfruttato è invece un sofisticato meccanismo di compensazione tra tensione superficiale e sforzi meccanici alla superficie di un solido.

Strutture quantiche: formazione e caratteristiche elettroniche

Si immagini di voler crescere un solido A sulla superficie di un solido B. Se i due solidi sono caratterizzati da reticoli con passo differente, la regione di confine (interfase) tra A e B sarà sede di forti tensioni meccaniche. Quando entrambi i solidi sono fasi estese e massive il risultato è normalmente che il solido A o sviluppa una struttura cristallina assai ricca di difetti oppure, nel caso estremo, delamina, cioè si distacca (sfaldandosi) dal solido B. Se tuttavia A viene cresciuto come uno strato estremamente sottile esso si trova, sotto opportune condizioni, a poter scegliere di crescere con una morfologia disomogenea: invece di dar luogo a uno strato coprente sopra B esso può formare delle isole di A aventi una struttura geometrica tale da rendere minime le tensioni meccaniche dovute alla differenza di struttura tra A e B. Queste particolari strutture hanno spesso la forma di piramidi che costituiscono, con ottima approssimazione, dei punti quantici. In modo del tutto analogo è possibile indurre una fase A a costituire dei filari atomici sopra un solido B, andando a formare dei fili quantici.

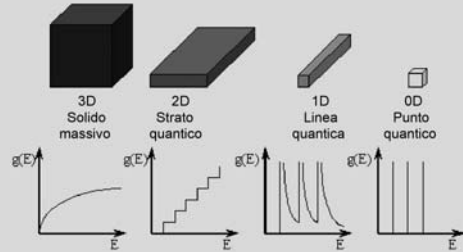
Quale che sia il dettaglio geometrico, tutte queste strutture quantiche confinate condividono la peculiare proprietà di essere caratterizzate, dal punto di vista delle loro proprietà ottiche ed elettriche, più dalla loro geometria che non dalla loro composizione chimica. Una rappresentazione della funzione densità elettronica $g(E)$ di una struttura quantica (definita come il numero degli stati elettronici con energia compresa tra E e $E+dE$ per unità di volume) evidenzia la somiglianza sostanziale tra la densità elettronica di un punto quantico e di un atomo: in un punto quantico gli stati elettronici sono caratterizzati da energie discrete, come nel caso atomico.



Al crescere della dimensionalità, le funzioni $g(E)$ delle strutture quantiche evolvono divenendo sempre più simili a quelle di un solido convenzionale. Le energie E_n degli stati elettronici di un punto quantico possono essere stimate utilizzando un semplice modello come quello della particella nella scatola, ricavando

$$E_n = h^2 (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) / 8mL^2$$

dove n_x , n_y e n_z sono numeri quantici, h è la costante di Plank, m la massa dell'elettrone e L la taglia della scatola (assunta cubica). Le strutture quantiche confinate sono anche caratterizzate da un ordinamento a livello nanometrico, e quindi soddisfano pienamente le condizioni necessarie per definirle come una nanostruttura. La loro tendenza ad assumere un ordinamento periodico sulle superfici è «sponanea»: essa non è infatti imposta con tecnica di nanoposizionamento, ma consegue dalla minimizzazione dell'eccesso di energia libera superficiale dovuta alle tensioni meccaniche tra i reticoli A e B. Ciò consente di aggiungere un'ulteriore pietra verso la realizzazione di dispositivi nanometrici che, per logica costruttiva, possano venire incontro alle richieste di progettabilità seriale che caratterizzano l'attuale disegno dei sistemi elettronici.



Conclusioni

Descrivere e spiegare cosa siano le nanotecnologie in uno spazio necessariamente limitato non è facile, e certamente finisce con il lasciare molte cose non dette. A parziale giustificazione di chi scrive, le nanoscienze sono un ambito così giovane da rendere lecita qualsiasi lettura parziale. Una cosa tuttavia non può essere taciuta, soprattutto in una rivista dedicata a insegnanti e studenti - ed è che le nanotecnologie (come peraltro le biotecnologie) contribuiscono alla nobile arte di scompigliare le carte e le piccole certezze disciplinari che tutti noi coltiviamo. Le nanoscienze non sono né fisica né chimica né ingegneria né biologia - e sono tutte queste cose messe assieme. Sono presumibilmente il portato della capacità di tante discipline scientifiche di parlarsi, contaminarsi e mischiarsi. Per quanti, come chi scrive, derivano le proprie competenze da un ambito disciplinare ben definito, le nanoscienze sono pertanto un rinnovato forte stimolo alla curiosità di conoscere al di là delle proprie competenze. E per quanti, come chi scrive, insegnano, una ulteriore indicazione dell'importanza di trasmettere ai propri discenti il desiderio di non racchiudersi negli specialismi, conservando quel desiderio di arrischiarsi su terreni inusuali. Che sono peraltro da sempre i suoli più ubertosi per la crescita della conoscenza. ❖

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- Dario Narducci, *Le nanotecnologie. Cosa sono, perché cambieranno la nostra vita, come la stanno già cambiando*, AlphaTest, Milano 2005.
 K. Eric Drexler, *Motori di creazione-L'era prossima della nanotecnologia*, Anchor Books, New York 1986; trad. it. <http://www.estropico.com/id171.htm>.
 Mark A. Ratner, Daniel Ratner, *Nanotechnology: A Gentle Introduction to the Next Big Idea*, Prentice Hall, Upper Saddle River 2003.