

La natura ci insegna come, a partire da comuni elementi chimici, si possono costruire oggetti di una complessità stupefacente. Sempre la natura, grazie ad una accurata disposizione di un numero limitato di elementi è in grado di creare macchine capaci di funzioni avanzatissime e addirittura di vivere.

# Nanotecnologie

## Costruire dal basso



a cura di  
Enzo Menna

Dipartimento di  
Chimica Organica  
Università di  
Padova

Centro CNR  
Meccanismi  
Reazioni Organiche

### Abstract Nanotechnologies

Thanks to a careful placing of a restricted number of elements, nature can create machines able to do very advanced functions and even to live. In this way, the new tendency that is quickly spreading in the scientific community and in the most technological advanced industry is explained: trying to imitate the way nature makes its products, that is «starting from the bottom». These are nanotechnologies.

In the coming future all this could flow into a real technological revolution, with considerable repercussions in economic and political fields.

In order to understand how concrete expectations are, we should consider that in the year 2000 the sole United States invested in nanotechnologies 270 millions dollars and in 2001 financings of 495 millions dollars are expected. If some applications are to be seen in the future, others, like nanomaterials and nanocomposites in particular, are already used.

At the moment, the nanocomposites market is very restricted but it is expected that it will reach millions of tons within ten years.

La natura ci insegna come, a partire da comuni elementi chimici, si possono costruire oggetti di una complessità stupefacente. Gli stessi atomi di carbonio che troviamo nella grafite o nel carbone, semplicemente ordinati secondo uno schema diverso, compongono un materiale sorprendente e affascinante come il diamante, oppure ancora possono legarsi all'ossigeno e formare l'anidride carbonica che esce dalle ciminiere e dai tubi di scarico e contribuisce al tanto temuto effetto serra. Grazie ad una accurata disposizione di un numero limitato di elementi la natura è in grado di creare macchine capaci di fun-

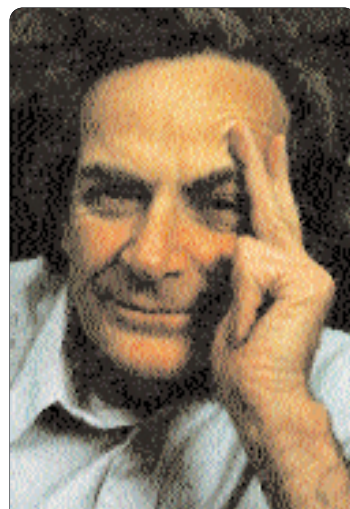
zioni avanzatissime e addirittura di vivere.

Ecco dunque spiegata la nuova tendenza che si sta rapidamente diffondendo nella comunità scientifica e nell'industria tecnologicamente più avanzata: tentare di imitare il modo in cui la natura costruisce i suoi prodotti, cioè «partendo dal basso». Il denominatore comune di quelle che vengono chiamate nanotecnologie è la manipolazione di singoli atomi e singole molecole o comunque la realizzazione di strutture che hanno dimensioni dell'ordine dei nanometri.

Il prefisso *nano* usato nelle unità di misura significa «un milionesimo». Quindi 1 nanometro (1 nm) indica un milionesimo di metro. Per avere un'idea delle dimensioni di cui stiamo parlando, si pensi che un comune foglio di carta ha uno spessore di circa 100.000 nanometri. Un singolo atomo misura meno di 1 nanometro, ad esempio un atomo di idrogeno ha un diametro di 1 angstrom, cioè 1 decimo di nanometro. Molecole

formate da qualche decina di atomi hanno generalmente dimensioni dell'ordine dei nanometri, mentre molecole giganti come le proteine possono estendersi per parecchie decine di nanometri. Il gradino successivo è occupato dalle cellule, come i globuli rossi che hanno un diametro di migliaia di nanometri, cioè dell'ordine dei micron o micrometri ( $\mu\text{m}$ ).

I singoli componenti dei microprocessori che troviamo nei personal computer dell'ultima



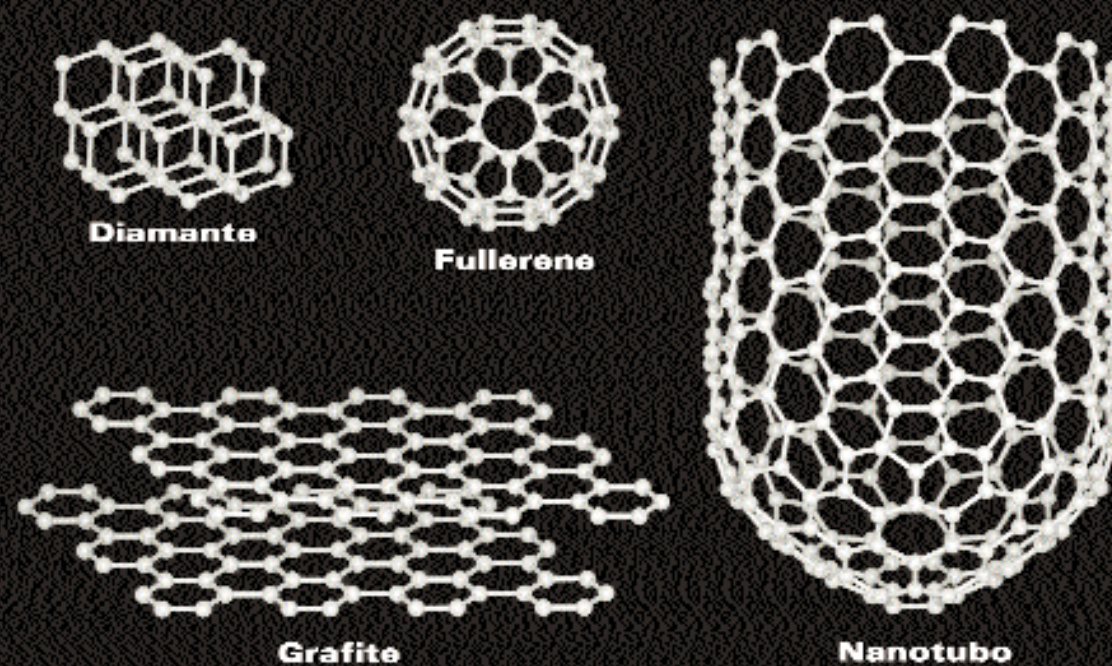
Il premio Nobel per la Fisica  
Richard Feynman.

generazione hanno dimensioni di circa 200 nanometri e, nonostante il rapido progresso delle tecniche tradizionali, queste si scontreranno ben presto con limiti fisici insuperabili. Ecco allora che la «costruzione dall'alto», cioè la lavorazione di quantità macroscopiche di materia per ottenere strutture microscopiche, lascia il posto alla «costruzione dal basso». Non si tratterà più, ad esempio, di incidere circuiti microscopici su un wafer di silicio, ma di costruire circuiti ancora più piccoli collegando opportunamente singole molecole, che funzionano come veri e propri componenti elettronici.

### Investimenti economici La scommessa sulle nanotecnologie

Il fenomeno delle nanotecnologie potrebbe sfociare, nel prossimo futuro, in una vera e propria rivoluzione tecnologica, al pari dell'avvento dell'elettronica e dell'informatica, ma con potenzialità ancora più avanza-

Le diverse forme allotropiche del carbonio.



Grafite

Nanotubo

te. Le ripercussioni in campo economico e politico sarebbero tali da determinare un enorme sviluppo delle nazioni capaci di cavalcare il rinnovamento a discapito di tutte le altre. Per capire quanto concrete siano le aspettative in questo senso, basti considerare che nel 1997 i finanziamenti governativi degli Stati Uniti per la ricerca e lo sviluppo nel campo delle nanotecnologie ammontavano a 116 milioni di dollari; nello stesso anno i finanziamenti ammontavano a 128 milioni di dollari in Europa e 120 in Giappone. La tendenza a credere nelle nanotecnologie è testimoniata dal fatto che nel 2000 i soli Stati Uniti hanno investito sulle nanotecnologie ben 270 milioni di dollari, mentre nel 2001 sono previsti finanziamenti per 495 milioni di dollari.

### Le basi scientifiche I vantaggi delle nano-dimensioni

Il pensiero scientifico che ha dato origine all'esplorazione del

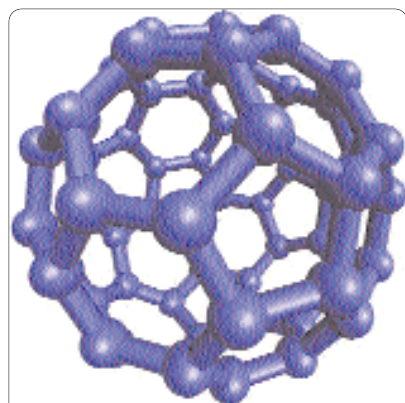
mondo delle dimensioni nanoscopiche ha iniziato a diffondersi alla fine degli anni '50. Si ritiene che la nascita delle nanotecnologie sia stata idealmente ispirata dal discorso tenuto da Richard Feynman nel 1959 al California Institute of Technology (Caltech). In sostanza Feynman, premio Nobel per la Fisica, sosteneva che l'unico motivo per cui non si era in grado di manipolare gli atomi uno alla volta era semplicemente il fatto che nessuno ci aveva provato a sufficienza. Non si conoscono infatti principi fisici che lo impediscano.

Alle nanotecnologie è comunemente attribuito il compito di costruire e manipolare oggetti con almeno una dimensione inferiore ai 100 nanometri. All'interno delle nanotecnologie (non a caso si usa il sostantivo al plurale) trovano collocazione innumerevoli campi di studio ed altrettanti svariati campi di applicazione. Possiamo parlare ad esempio di nanotecnologia molecolare, di macchine molecolari, di nanostrutture e materiali

Un comune foglio di carta ha uno spessore di circa 100.000 nm; un atomo di idrogeno ha un diametro di 1 decimo di nm; molecole giganti come le proteine possono estendersi per diverse decine di nanometri.

Nel 2001 gli USA investiranno nelle tecnologie l'equivalente di mille miliardi di lire

► nanostrutturati, comprendendo prodotti fra loro assai diversi,



Il fullerene  $C_{60}$  è formato da una sfera di atomi di carboni disposti ad anelli esagonali e pentagonali come un comune pallone da calcio.

Il fullerene venne scoperto nel 1985 da Robert F. Curl e Richard E. Smalley della Rice University (Texas) e Harry Kroto dell'Università del Sussex che per questo meritano il Nobel per la chimica nel 1996.

a l c u n i quasi fantascientifici, altri già introdotti sul mercato in modo trasparente per l'utente.

G l i e n o r m i vantaggi che derivano dalla realizza-

zione di dispositivi grandi quanto una molecola o poco più, siano essi macchine o componenti elettronici, è facilmente intuibile. Non è invece altrettanto evidente, almeno per i non addetti ai lavori, quanto possano migliorare le prestazioni di un materiale quando le

di tali proprietà in misura rilevante poiché possiedono molti più atomi superficiali di un materiale tradizionale.

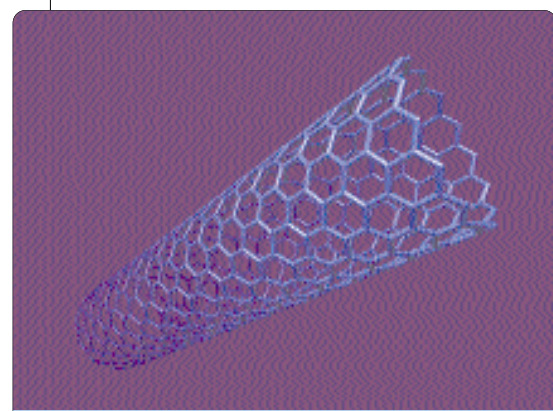
Sia la Fisica che la Chimica forniscono le basi su cui lavorare per costruire il mondo delle nanotecnologie: si può anzi dire che i fisici e i chimici si incontrano nello studio dei nanosistemi, e in questo ambito il confine fra le due discipline si presenta sempre più sfumato. Proprietà chimiche e proprietà fisiche si fondono, in quanto gli oggetti diventano tanto piccoli da comportarsi come molecole, mentre le molecole vengono manipolate come se fossero oggetti macroscopici.

Scendendo al di sotto di certe dimensioni i comportamenti dei materiali assumono risvolti tipici della fisica quantistica, così ad esempio un «filo» conduttore del diametro di un nanometro non seguirà più le comu-

puter quantistici dalle prestazioni irraggiungibili con le tecnologie attuali.

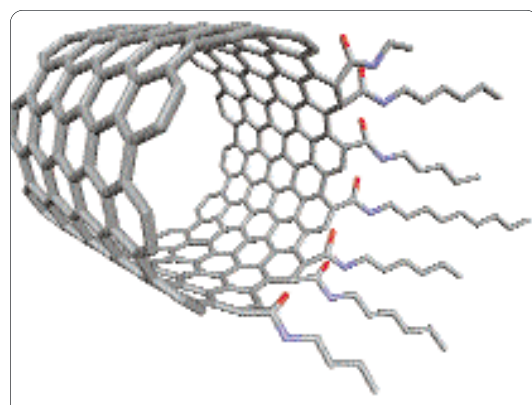
Tra le sostanze più promettenti per le possibili implicazioni nanotecnologiche va sicuramente ricordato il carbonio nelle sue varie forme. Oltre alla grafite e al diamante il carbonio può formare delle strutture a gabbia chiusa, dette fullereni, che si trovano in tracce nel nerofumo e che si possono ottenere in quantità discrete vaporizzando grafite mediante scariche elettriche o impulsi laser. Il più conosciuto è il fullerene  $C_{60}$ , una sfera di 60 atomi di carbonio che ha un diametro di circa 1 nanometro ed è del tutto simile ad un comune pallone da calcio. Il fullerene venne scoperto nel 1985 da parte di Robert F. Curl e Richard E. Smalley della Rice University (Texas) e Harry Kroto dell'Università del Sussex che per questo

meritarono il premio Nobel per la chimica nel 1996. Il fullerene ha immediatamente attratto l'attenzione di numerosi scienziati in tutto il mondo, poiché le sue molteplici proprietà lo rendono potenzialmente prezioso in svariati campi di applicazione. Si è scoperto ad esempio che in combinazione con alcuni elementi può



La struttura dei nanotubi di carbonio si ottiene arrotolando un piano formato da anelli esagonali, come quelli che formano la grafite.

particelle di cui è formato hanno dimensioni dell'ordine dei nanometri. In molti casi, ad esempio, le proprietà innovative dei nanomateriali nascono dall'elevato rapporto fra la superficie di interfaccia tra particelle e il volume. Nei solidi infatti gli atomi superficiali hanno proprietà spesso molto diverse da quelli più interni, e i materiali nanostrutturati risentono



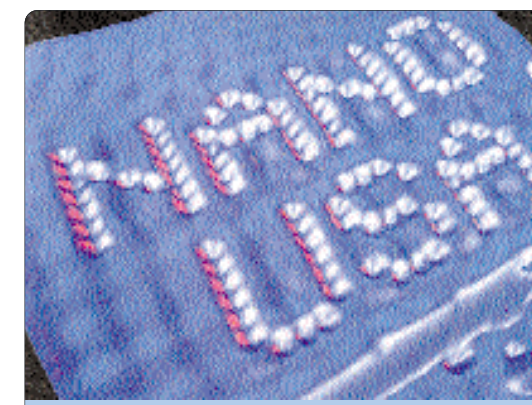
È possibile tagliare i nanotubi in spezzoni per poi attaccare alle estremità molecole organiche che ne modificano le proprietà.

ni leggi di elettrodinamica, quanto quelle di un elettrone all'interno di un orbitale. Le conseguenze sono da un lato la necessità di studi teorici e sperimentali estremamente complessi, per capire quello che succede e prevedere il comportamento dei nuovi prodotti, dall'altro lo schiudersi di nuove e spesso inattese potenzialità, come la prospettiva di realizzare com-

formare cristalli superconduttori con caratteristiche interessanti. In presenza di ossigeno e di luce promuove particolari reazioni ossidative nei confronti di alcuni tipi di molecole organiche (come ad esempio il DNA) che potrebbero trovare applicazioni in campo farmacologico o nello smaltimento di residui inquinanti. Le sue proprietà fotofisiche lo rendono un

ottimo candidato alla realizzazione di dispositivi di limitazione ottica, cioè materiali intelligenti che, pur essendo trasparenti, bloccano fasci luminosi di intensità superiore ad una certa soglia, proteggendo ad esempio gli occhi di chi lavora con i laser. Particolare interesse ha suscitato la scoperta che, grazie alla sua forma, alle sue dimensioni e caratteristiche chimiche, il  $C_{60}$  è in grado di legarsi ad un enzima del virus HIV bloccandone la replicazione, anche se a tutt'oggi questa funzione è stata riscontrata solo in vitro.

Parenti stretti dei fullereni sono i nanotubi di carbonio, formati da piani di grafite (cioè reticoli esagonali di atomi di carbonio) arrotolati a forma di tubo, con le due estremità chiuse da calotte emisferiche. Il diametro è generalmente compreso tra 1 e 2 nanometri, mentre la



Scrittura realizzata con molecole di monossido di carbonio su una superficie di rame presso i laboratori di ricerca IBM ad Almaden. Ogni lettera misura 3x4 nanometri.

lunghezza si può estendere per diversi micron. Nei pochi anni trascorsi dalla loro scoperta (effettuata nel 1991 da Sumio Iijima) si sono individuate innumerevoli interessanti caratteristiche ed altrettante potenziali applicazioni.

Le aree superficiali esterna e interna per un nanotubo sono rispettivamente dell'ordine dei

400 e 300 metri quadrati per grammo. Questo rende il materiale estremamente efficiente nell'adsorbimento di gas o vapori: un'applicazione promettente consiste nell'utilizzo di nanotubi come materiale di stoccaggio per idrogeno in prospettiva, ad esempio, dell'impiego di questo come propellente per autotrazione. Studi recenti rilevano un'efficienza molto elevata e superiore a quella di sistemi attualmente disponibili.

Anche le proprietà meccaniche di singoli nanotubi risultano di estremo interesse ai fini applicativi: essi sono il materiale più forte attualmente conosciuto (100-150 volte più forte dell'acciaio). Si è rilevato inoltre che il nanotubo è estremamente flessibile, risultando in grado di sopportare forti angoli di piegatura senza riportare modificazioni permanenti.

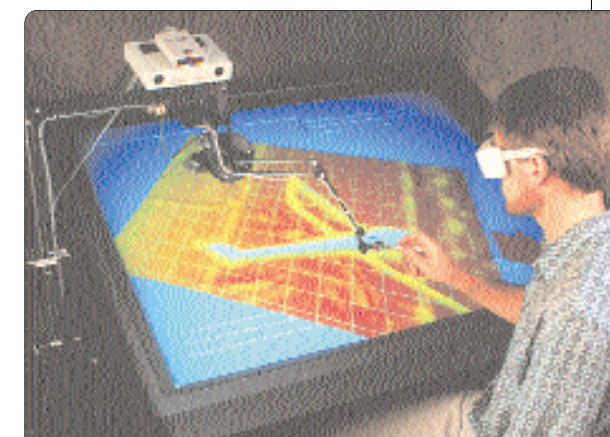
Le proprietà elettroniche ed elettriche sono fra quelle di maggiore interesse nell'ambito delle applicazioni nanotecnologiche: sono già stati fabbricati transistor monomolecolari sperimentali costituiti da un singolo nanotubo semiconduttore.

Singolare è il fatto che un nanotubo possa passare da conduttore a semiconduttore, semplicemente variandone la forma.

### Gli strumenti Da dove cominciare

Una spinta determinante alla nascita delle nanotecnologie è

stato l'avvento del microscopio a scansione a effetto tunnel STM (*Scanning Tunneling Microscope*), ideato e realizzato per la prima volta nel 1982 presso i laboratori IBM di Zurigo da Gerd Binnig e Heinrich Rohrer che per questo sono stati insigniti del premio Nobel 1986 per la fisica. I componenti essenziali di un tipico strumento STM sono una sonda metallica con una punta delle dimensioni un singolo atomo (0.2 nm), le guide piezoelettriche per gli spostamenti lungo le direzioni x, y e z, l'elettronica di retroazione per controllare la posizione della punta sul campione, e un computer che gestisca i parametri sperimentali e i dati ottenuti. La sonda segue il profilo della superficie da analizzare a una distanza tale da risentire di interazioni quantistiche con gli atomi del campione. Le interazioni permettono ad alcuni elettroni



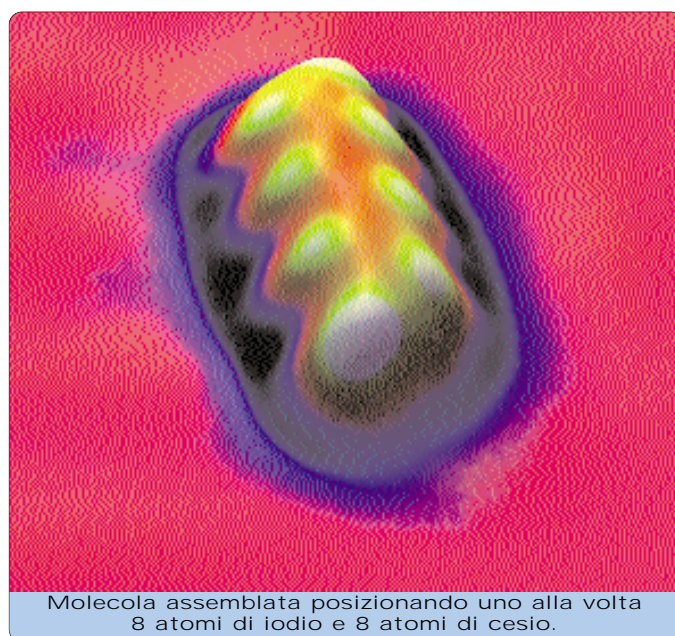
Il nanomanipolatore realizzato presso la North Carolina University a Chapel Hill.

di «saltare» dalla superficie alla punta generando un segnale che viene elaborato dal computer per costruire una mappa tridimensionale. Dal STM discende una famiglia di microscopi con sonda a scansione SPM (*Scanning Probe Microscope*) che si basano su principi diversi e quindi permettono di vedere gli oggetti secondo diversi criteri, come ad esempio la trasmis-

Recentemente si è realizzato un nanomanipolatore che permette non solo di vedere e toccare gli atomi, ma anche di «sentire» la forza che oppongono allo spostamento.

► sione del calore, la magnetizzazione o la composizione chimica. Recentemente si è anche sperimentato, con ottimi risultati, l'impiego di nanotubi come sonda.

Una svolta decisiva venne nel 1990, quando, sempre nei centri di ricerca dell'IBM, Donald Eigler ed Erhard Schweizer riuscirono per la prima volta a spostare dei singoli atomi usando un microscopio a scansione. Posizionando 35 atomi di xeno su un cristallo di nichel composero il logo IBM nello spazio di 3 nanometri. Da allora sono state disegnate composizioni sempre più complesse e si è arrivati di recente alla realizzazione di un nanomanipolatore che, implementando tecniche di realtà virtuale e un joystick a retroazione, permette non solo di vedere e toccare gli atomi, ma anche di «sentire» la



Molecola assemblata posizionando uno alla volta 8 atomi di iodio e 8 atomi di cesio.

forza che oppongono allo spostamento.

### *Presente e futuro* Le nanotecnologie entrano nella nostra vita

Mentre le applicazioni nel campo della nanoelettronica e della robotica molecolare appartengono a un probabile futuro, i nanomateriali stanno già trovando un loro mercato.

La maggior parte delle industrie che investono nelle nanotecnologie appartengono all'area dei materiali e produco-

no nanomateriali organici, inorganici e metallici. I nanomateriali possono trovare applicazioni in polimeri, batterie, dispositivi elettronici, cosmetici, sensori, celle a combustibile, catalizzatori rivestimenti per metalli e scher-

mi per computer.

Tra i nanomateriali più promettenti un posto di rilievo è occupato dai nanocompositi. Si tratta di comuni polimeri organici in cui vengono inglobate particelle inorganiche di dimensioni nanometriche che inducono un drastico miglioramento delle proprietà in termini di forza, resistenza meccanica, resistenza al calore e impermeabilità. Tutto ciò senza alterare le proprietà ottiche, come la trasparenza, dato che le particelle hanno dimensioni dell'ordine delle lunghezze d'onda

Si producono già compositi, a base di nylon o policarbonato, contenenti nanotubi, che mantengono le principali proprietà fisiche della plastica, ma formano una superficie conduttrice.

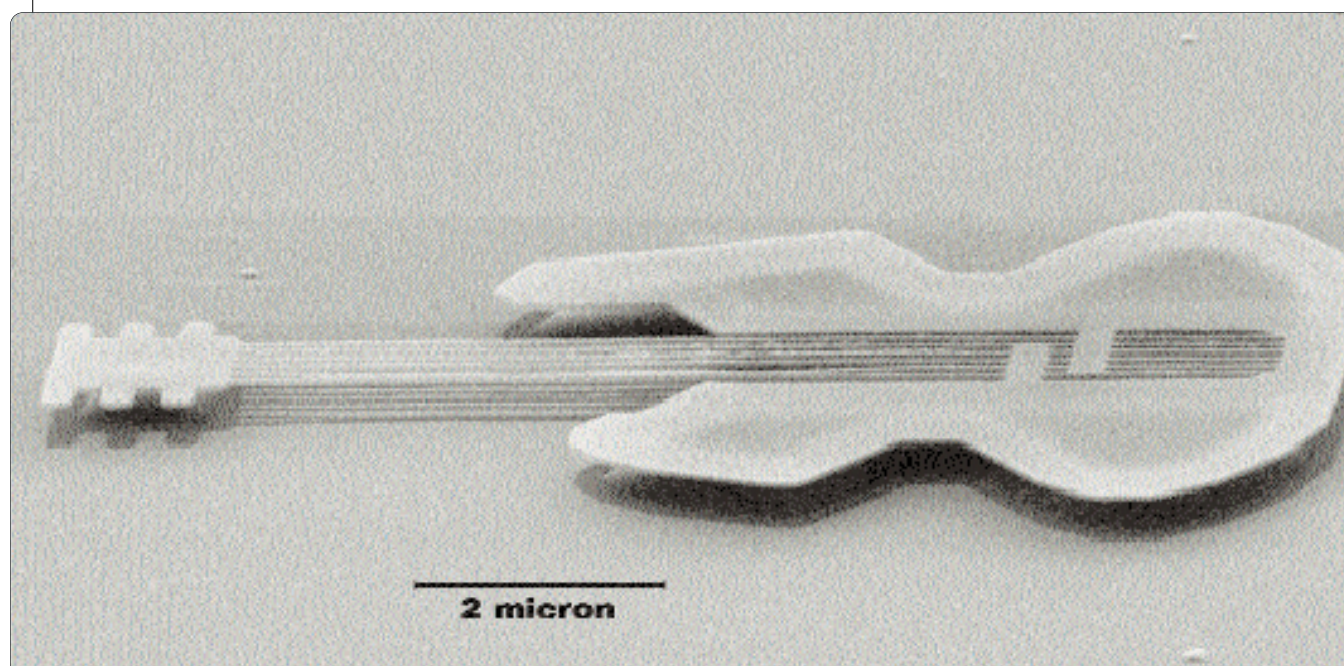
della luce visibile. Tanto per fare un esempio, una delle esigenze a cui potranno forse rispondere i nanocompositi è la realizzazione di bottiglie per bevande gassate che non siano permeabili ai gas quanto quelle ora disponibili. Allo stato attuale il mercato dei nanocompositi è molto limitato, ma in fase di rapido sviluppo, tanto che le ricerche di mercato prevedono che la produzione salga a milioni di tonnellate entro la fine del decennio. I primi settori a beneficiare di questi polimeri innovativi saranno il settore automobilistico e quello degli imballaggi.

Vengono già prodotti materiali compositi, a base di nylon o policarbonato, contenenti nanotubi, che mantengono le principali proprietà fisiche della plastica, ma formano una superficie conduttrice. Questi materiali evitano l'accumulo di elettricità statica e sono quindi ottimali per l'impiego all'interno di dispositivi elettronici. Analogamente fibre organiche come nylon e poliestere contenenti una piccola percentuale di nanotubi presentano conduttività elettrica, oltre ad un aumento della resistenza meccanica.

Un altro settore molto promettente è quello dei materiali nanoceramici, particolarmente robusti, che vengono attualmente prodotti anche in Italia da diverse aziende. Tra i nanomateriali prodotti nel nostro paese troviamo anche metalli ottenuti per sinterizzazione di nanopolveri, che trovano impiego, tra gli altri, nei settori biomedicale, motoristico, dell'uten-sileria e dell'occhialeria.

Sono circa 4000 all'anno le tonnellate di biossido di titanio (TiO<sub>2</sub>) nanocristallino prodotte nel mondo. Il materiale viene impiegato come pigmento, come filtro per i raggi ultravioletti (li assorbe pur essendo trasparente alla luce visibile) o per particolari rivestimenti superficiali.

Già da questi pochi esempi, e senza prendere in considerazione gli scenari fantascientifici di un mondo pervaso di nanomacchinari e nanorobot, è possibile intuire le potenzialità delle nanotecnologie e l'impatto dirompente che esse avranno nel prossimo futuro sul nostro modo di vivere.



La chitarra più piccola del mondo, realizzata alla Cornell University, è lunga 10 micrometri - più o meno le dimensioni di una cellula. Ciascuna delle sei corde è larga circa 50 nanometri, cioè un centinaio di atomi.