



scienza attiva®

Le Nanotecnologie: una introduzione alle genesi e agli orizzonti

Prof. Fabrizio Pirri, Politecnico di Torino

www.polito.it/micronanotech www.latemar.polito.it

Introduzione

Da parecchi anni la ricerca nel settore delle microtecnologie procede a grandi passi ed i suoi effetti sono ormai evidenti e consolidati in molti settori. Molte di queste tecnologie, prime fra tutte quelle connesse con l'elettronica, si sono inserite in applicazioni e in attività tecnicamente lontane, anche quelle più resistenti a forme di innovazione. La tendenza alla diminuzione di scala non si è comunque conclusa e in questi anni si assiste ad una nuova e forte espansione. La miniaturizzazione ha ormai raggiunto limiti impensati arrivando su scale dove si contano le singole molecole e i singoli atomi. Su queste scale **nanoscopiche** si scoprono le sorprendenti proprietà della fisica quantistica, per cui la materia presenta "caratteristiche insolite" non riscontrabili su scala macroscopica.

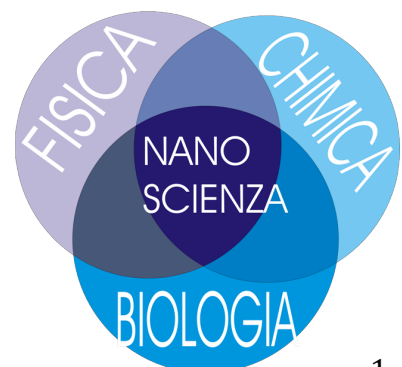
Una percentuale consistente del mondo dei nanosistemi è rappresentata da dispositivi in cui si impiegano le tecnologie derivanti dalla microelettronica, spinte sino alla scala nanometrica, per ottenere funzionalità elettroniche, ottiche, fluidiche, meccaniche integrate, da applicarsi a campi diversissimi che vanno dalla microelettronica, alle telecomunicazioni, alla sensoristica, al tessile, al settore ambientale e biologico.

In tutte queste applicazioni il dispositivo può avere più ruoli:

- quello di estrarre informazione dal sistema a cui si applica per attività di indagine o di controllo;
- quello di ridurre a scala micrometrica e/o sub-micrometrica funzionalità del macrocosmo con evidenti vantaggi;
- quello di ottenere nuove funzionalità non esistenti su scala macroscopica.

E' inoltre possibile realizzare materiali intelligenti (funzionalizzati) spesso sfruttando le capacità di auto-organizzazione della materia. E' questa attualmente la via più promettente alle nanotecnologie. L'obiettivo base in questo caso consiste nel cercare di imitare la natura nella sua capacità di costruire auto-organizzandosi in un processo evolutivo, partendo da piccoli elementi costituenti per ottenere oggetti più grandi.

Ancor più delle microtecnologie, le nanotecnologie richiedono sinergie, spesso difficili da attuare, tra molte e differenti discipline scientifiche e tecnologiche. Molto del successo futuro si basa proprio sulla fertilizzazione incrociata di diversi rami della ricerca pura ed applicata, sul lavoro di squadra tra diversi specialisti volto a trovare nuovi materiali, nuovi processi, nuove applicazioni e alla realizzazione di prodotti innovativi.





Le nanotecnologie offrono dunque la possibilità di concorrere ad un salto radicale. A lungo termine diverranno pervasive coprendo campi che spaziano dalla meccanica all'elettronica, dal tessile alla farmaceutica, alla biologia, all'ambiente e all'energetica

Poniamoci adesso alcune domande per approfondire i molteplici aspetti di questo grande tema.

Cosa sono le nanoscienze e le nanotecnologie?

Le nanoscienze sono lo studio della materia alla scala nanometrica (miliardesimo di metro); le nanotecnologie sono la creazione e l'uso di materiali, di dispositivi e di sistemi attraverso il controllo della materia su scale nanometriche.

exa-	Em	10^{18}	1,000,000,000,000,000,000	
peta-	Pm	10^{15}	1,000,000,000,000,000	...
tera-	Tm	10^{12}	1,000,000,000,000	...
giga-	Gm	10^9	1,000,000,000	miliardo
mega-	Mm	10^6	1,000,000	milione
kilo-	km	10^3	1,000	migliaia
metro	m	10^0	1	uno
deci-	dm	10^{-1}	1/10	decimo
centi-	cm	10^{-2}	1/100	centesimo
milli-	mm	10^{-3}	1/1,000	millesimo
micro-	mm	10^{-6}	1/1,000,000	milionesimo
nano-	nm	10^{-9}	1/1,000,000,000	miliardesimo
pico-	pm	10^{-12}	1/1,000,000,000,000	
femto-	fm	10^{-15}	1/1,000,000,000,000,000	
atto-	am	10^{-18}	1/1,000,000,000,000,000,000	

Fig.1: Sistema metrico decimale



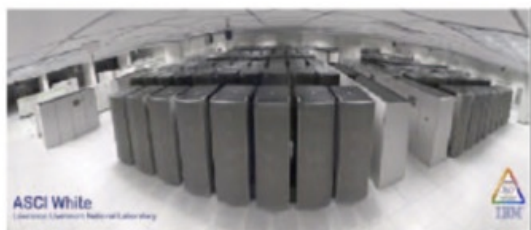
Gli oggetti o le strutture che possiamo 'osservare' alla scala del nanometro e su cui possiamo interagire sono le più piccole: singoli atomi o loro aggregati.

E' complicato fare tutto questo?

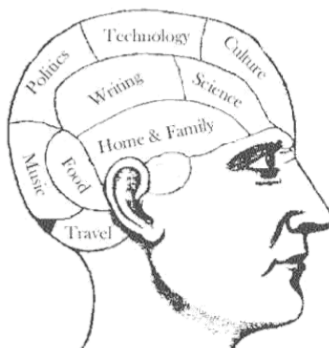
Una linea attualmente seguita in molti filoni della nanotecnologia è: **capire e copiare la natura**. La natura è nanotecnologia per definizione e, con un processo che viene chiamato autoaggregazione, partendo dai singoli atomi costruisce strutture complesse nanometriche che poi interagiscono assieme per dare origine ai fenomeni che percepiamo e alle strutture macroscopiche che ci sono familiari (vita inclusa). Nel suo processo evolutivo la natura ha dato origine, autoassemblando atomi e molecole, a sistemi complessi con proprietà incredibili. Ad esempio esistono piante che sono in grado di regolare la loro capacità di assorbire o riflettere la radiazione solare; esistono strutture colorate in cui il colore non è dovuto a sostanze chimiche ma al processo di riflessione della luce solare su nanoparticelle assolutamente trasparenti (sono le ali delle farfalle, le piume di alcuni uccelli tropicali....); pensiamo anche alla capacità delle lucciole di emettere luce con bassissimo consumo.

Il processo seguito dalla natura è detto 'bottom-up' (autoaggregazione dalle strutture più piccole fino al prodotto finale macroscopico) mentre l'approccio tecnologico classico, per la riduzione di macchinari e strumenti, è sempre stato del tipo inverso, detto 'top-down'.

I due approcci sono radicalmente diversi e con risultati e prospettive diverse.



NEC Supercomputer:
Tecnologia top-down
Tons
>500 kW
40 teraflops



Cervello:
Bottom-up (basato sull'autoaggregazione)
1.3 kg
10 W
>100 teraflops

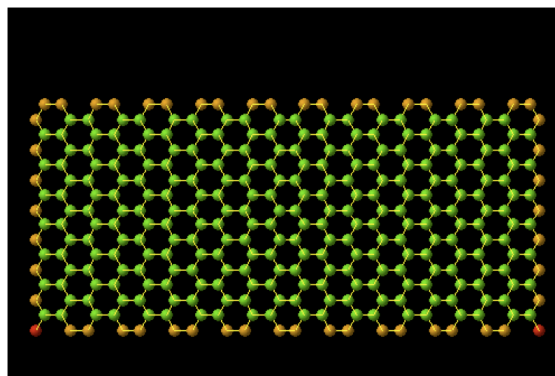
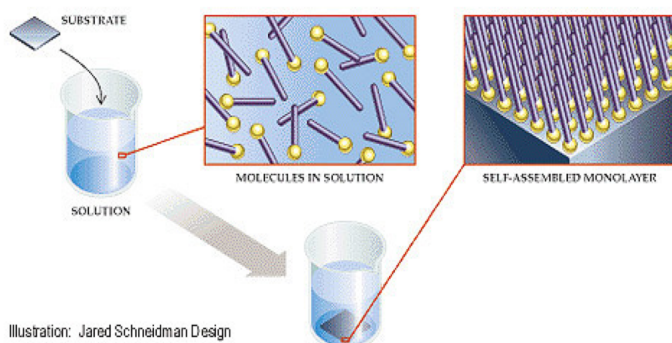
1tera=1000 miliardi FLOPS: Floating Point Operation per secondo

Utilizzando il meccanismo dell'autoaggregazione è quindi possibile costruire nuove strutture e materiali.



Autoaggregazione (bottom-up)

Nanotubi di carbonio creati per bottom-up



Quanto sono lontane le nanotecnologie dall'utilizzo quotidiano?

Meyya Meyyappam (direttore della ricerca sulle nanotecnologie alla NASA) in un incontro con investitori della Silicon Valley (riportata sul Sole 24 Ore del 2 dicembre 2004) ha dichiarato:

"..... la nanotecnologia è la creazione di materiali, processi, dispositivi e sistemi utili o funzionali attraverso il controllo della materia a livello dei nanometri e lo sfruttamento di fenomeni e proprietà innovative (fisiche, chimiche e biologiche) su quella scala di grandezza

... finora c'è stata molta nanoscienza e poca nanotecnologia.

Ciò di cui abbiamo bisogno è molta più enfasi sullo sviluppo tecnologico da parte della comunità degli ingegneri ... le persone non comprano nanoscienza e/o nanotecnologia ma prodotti ...

La maggioranza degli start-up e dei laboratori tecnologici hanno fondi limitati, gli apparati di ricerca nel settore nanotech sono costosi. Dobbiamo costruire facilities e condividere l'utilizzo di strumenti di laboratorio per governare il passaggio nanoscienza - nanotecnologia - prodotto e dobbiamo formare i futuri scienziati, tecnologi e manager ..."

Queste frasi sintetizzano l'ambizioso programma che dovrà portare la nanoscienza nella nostra vita quotidiana attraverso materiali, dispositivi elettronici e bio-medicali, la soluzione dei problemi energetici e dell'ambiente ed altro ancora.

Un po' di storia. Come siamo arrivati a tutto questo?

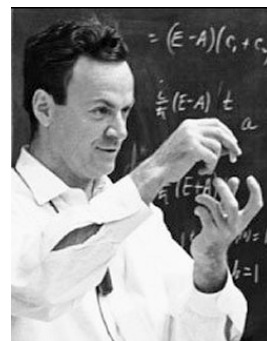
Quando collocare la nascita delle nanotecnologie è un dibattito aperto tra filosofi, storici della scienza e scienziati. E' indubbio che se le nanotecnologie sono conseguenza della manipolazione della materia alla scala del nanometro la nascita delle nanoscienze va collocata nel periodo della rivoluzione fisico-tecnologica che ha portato alla nascita della meccanica quantistica (1900-1930). Ma come sempre accade serve del tempo perché raggiungere la reale consapevolezza di concetti innovativi e tanto più per pensarne un utilizzo tecnologico.

Il primo riferimento alla nanotecnologia fu fatto da R.Feynman nel 1959. Nel discorso **"There's plenty of room at the bottom"** indicò un modo per sviluppare l'abilità di manipolare molecole ed atomi direttamente tramite "macchinari molecolari".



" Ciò di cui voglio parlare è il problema di manipolare e controllare le cose su una piccola scala. Appena accenno a questo, la gente mi parla della miniaturizzazione e di quanti progressi si siano fatti fino a oggi. Mi parlano di motori elettrici <http://www.caltech.edu/> grandi quanto l'unghia del vostro mignolo [...]. Ma questo è niente; è il passo più primitivo nella direzione che intendo discutere [...]. Quando nel 2000 la gente guarderà indietro, si chiederà perché si sia arrivati al 1960 prima di muoversi seriamente in questa direzione. Ma non mi spaventa affrontare anche la questione finale, cioè se - in un lontano futuro - potremo sistemare gli atomi nel modo in cui vogliamo; proprio i singoli atomi, al fondo della scala! [...] Per quanto ne so, i principi della fisica non impediscono di manipolare le cose atomo per atomo. Non è un tentativo di violare alcuna legge; è qualcosa che in principio può essere fatto, ma in pratica non è successo perché siamo troppo grandi C'è un sacco di spazio laggiù. Buon divertimento!"

Richard Feynman



Il termine **nanotecnologia** comparve, invece, nel 1974 nell'articolo "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'" di N.Taniguchi: "'Nano-technology' mainly consists of the processing of, separation, consolidation, and deformation of materials by one atom or one molecule.". Si tratta della prima pubblicazione scientifica in cui la fattibilità della nanotecnologia fu dimostrata.

L'esistenza delle complesse strutture molecolari presenti in ogni sistema vivente è utilizzata da Drexler per dimostrare la possibilità teorica della progettazione e costruzione di strutture altrettanto o più complesse con mezzi di ingegneria molecolare. Pur mantenendo il rigore di una pubblicazione scientifica, Drexler ha realizzato un'opera di divulgazione scientifica in cui illustra non solo le basi teoriche della nanotecnologia, ma anche una serie di affascinanti speculazioni sulle possibili conseguenze dell'arrivo di una nanotecnologia avanzata sulla condizione dell'umanità e del pianeta, siano queste positive o negative.

Da quel momento, la definizione di nanotecnologia coinvolge qualunque oggetto abbia dimensioni fino a 100 nm.

A partire dal 1980 l'idea deterministica di **nanotecnologia**, intesa come manipolazione di singoli atomi e molecole, fu analizzata e fatta propria da K.E. Drexler, che si fece promotore della divulgazione dei fenomeni osservabili su scala nanometrica e delle conseguenti implicazioni tecnologiche future e futuribili. Tale visione proposta da Drexler è spesso identificata come **nanotecnologia molecolare**, come si può leggere tra le pagine del suo libro: "Engines of creation: the coming era of nanotechnology".

Dal punto di vista sperimentale, **nanotecnologia** e **nanoscienza** iniziarono a comparire intorno agli anni Ottanta attraverso due grosse linee di sviluppo: la nascita della **cluster science** (i cluster sono aggregati di pochi atomi) e l'invenzione della **Scanning Tunnel Microscopy**. Ma ricordiamo che già nel 1974 venne brevettato il primo dispositivo elettronico molecolare da parte dell'IBM.

Muovendosi in tale direzione, in un contesto nanotecnologico, si è giunti dapprima alla scoperta del fullerene nel 1985 e successivamente ai nanotubi di carbonio. Si iniziò a nutrire interesse verso i dispositivi a singolo elettrone, dispositivi basati su DNA ed elettronica molecolare. Successivi sviluppi hanno portato a studiare con molto interesse nanocristalli e quantum dots.

Ad oggi, l'interesse della nanotecnologia si è riversato principalmente sulla biologia (nanosensori e manipolatori di materia biologica), sulla medicina (marcatori, rivelatori, distributori di farmaci), sui nuovi materiali, sull'informazione, la computazione e la quantistica (quantum computing, memorie, display flessibili a LED organici) e sugli approcci stocastici e deterministici con i quali poter manipolare superficialmente su un materiale singole molecole e atomi.



I due maggiori filoni realizzativi si identificano in due tipi di approcci diversi, ma complementari: un approccio *top-down*, in cui si tende a spingersi verso la massima miniaturizzazione tramite tecniche di litografia elettronica, scansione a sonda e nanostampa; e un approccio *bottom-up*, nel quale ci si concentra sull'aggregazione di elementi molto piccoli tramite auto-organizzazione (film di Langmuir, SAM, strained semiconductors, nanowire o strutture molecolari a base di carbonio (i già citati nanotubi e il fullerene C60)).

Le nanotecnologie si occupano dunque di materiali e dispositivi, con lo scopo di migliorare e di risolvere, tramite nuove soluzioni, vecchi aspetti e problemi. L'unica scienza che finora ha usato un nuovo tipo di terminologia è stata l'elettronica di piccole dimensioni (microelettronica) e quindi sarebbe profondamente errato ritenere che la nanotecnologia si rivolga essenzialmente ai chip, come molti scienziati e studiosi fanno. Il concetto di nanotecnologia dev'essere invece inteso diversamente e non inserito in un contesto monoculturale: è un nuovo modo di pensare alle culture esistenti e si applica a tutte le necessità umane: dal cibo all'energia, dai materiali alla medicina, dall'informatica all'ambiente, coinvolgendo spesso anche gli aspetti più negativi dal punto di vista sociale.

Parte di tutti gli studi scientifici che hanno iniziato a svilupparsi una decina di anni fa, oggi si stanno concretizzando in realtà. Siamo entrati nell'era prettamente attuativa delle nanotecnologie: si stanno prospettando le più affascinanti ipotesi delineate soprattutto da arte e cinema, forti canali di divulgazione di futuribile spesso non attuabile.

E così ci stiamo avvicinando, senza forse ancora essere pronti dal punto di vista etico e morale, a passi da gigante all'aggregatore di materia di Stephenson, alle bambole autocoscienti di McAuley, al cyberspazio e alla realtà virtuale di Gibson, ai cyborg di Robocop...

*"... Con un po' di esperienza, è facile distinguere fin dal principio le strutture che possono stare in piedi da quelle che cascano o che vanno subito a pezzi, o da quelle altre che sono possibili solo sulla carta. Ma siamo sempre dei ciechi, anche nel caso migliore, cioè che la struttura sia semplice e stabile: ciechi, e **non abbiamo quelle pinzette che sovente ci capita di sognare di notte, come uno che ha sete sogna le sorgenti, e che ci permetterebbero di prendere un segmento, di tenerlo ben stretto e dritto, e di incollarlo nel verso giusto sul segmento che è già montato. Se quelle pinzette le avessimo (e non è detto che un giorno non le avremo) saremmo già riusciti a fare delle cose graziose che fin adesso le ha fatte solo il Padreterno, per esempio montare non dico un ranocchio o una libellula, ma almeno un microbo o il semino di una muffa.***

Ma per adesso non le abbiamo, e in conclusione siamo dei montatori primitivi. Siamo, appunto, come degli elefanti a cui venga consegnata una scatola chiusa con dentro tutti i pezzi di un orologio; noi siamo molto forti e pazienti, e scuotiamo la scatola in tutti i sensi e con tutte le nostre forze: magari la scaldiamo anche, perché scaldare è un altro modo di scuotere. Bene, qualche volta, se l'orologio non è di un modello troppo complicato, a furia di scuotere, a montarlo si riesce; ma lei capisce che è più ragionevole arrivarci a poco per volta, montando prima due pezzi solo, poi il terzo e così via. Ci va più pazienza, ma di fatto si arriva prima: il più delle volte facciamo appunto così.

Come vede siete più fortunati voi altri, che le vostre strutture vedete crescere sotto le mani e sotto gli occhi, verificandole a mano a mano che vengono su: e se sbagliate ci va poco a correggere. E' vero che noi abbiamo un vantaggio: ogni nostro montaggio non porta ad un traliccio solo, ma a tanti in una volta. Proprio tanti, un numero che lei non se lo può immaginare, un numero di venticinque o ventisei cifre."

Primo Levi "La chiave a stella"



Orizzonti applicativi

L'innovazione nelle conoscenze e nelle tecnologie costituisce l'elemento determinante dello sviluppo e del benessere della società di questo nuovo secolo; tutti i recenti progressi nelle scienze della vita, della salute, dell'alimentazione, dell'ambiente, della informazione, dei materiali, della energia hanno in comune lo studio e la comprensione dei fenomeni fisici e biofisici alle scale più piccole, quelle dei sistemi sopramolecolari, delle molecole, degli atomi e delle strutture atomiche. Non vi è settore che, in prospettiva, possa sottrarsi alla sfida di indagare, conoscere e sfruttare le proprietà della materia a partire dalle sue strutture più minute; le Micro e le Nano Tecnologie offrono la possibilità di progettare e introdurre innovazione alle scale dove le ricadute sulle caratteristiche e sulle prestazioni dei prodotti sviluppano la massima potenzialità.

Lo sviluppo delle conoscenze e delle tecnologie alla nanoscala sta determinando una rivoluzione nel modo di concepire, progettare e realizzare prodotti e sistemi innovativi.

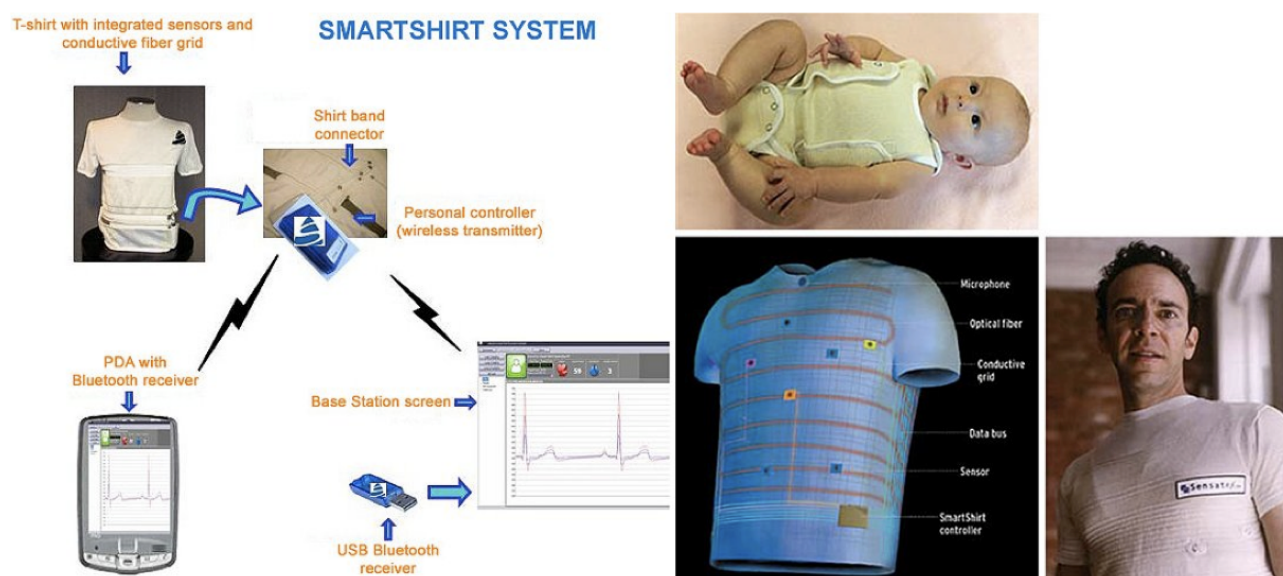
Il settore dei materiali è quello che maggiormente è stato influenzato dalla "rivoluzione nanotecnologica".

Materiali

I materiali nanostrutturati, prodotti dalla scienza e dalla fisica della materia operante a scala nanometrica, sulla spinta di richieste provenienti dal mondo scientifico e industriale sono stati utilizzati con successo in svariati prodotti.

Si tratta di materiali nanostrutturati polimerici, metallici, ceramici, semiconduttori, magnetici; oppure della nanostrutturazione di materiali massivi o di superficie con processi fisico-chimici. I materiali studiati trovano applicazioni meccaniche, biomediche, fotoniche, sensoristiche, catalitiche, energetiche, etc.....

Esempio di nuovi materiali in campo tessile





Nanobioteecnologie

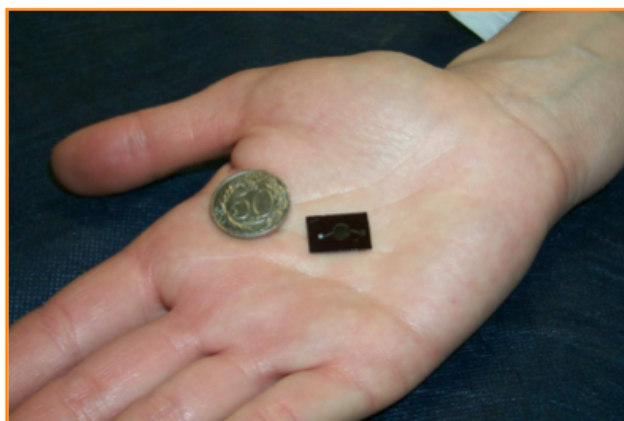
Altro settore in fase di colonizzazione da parte delle nanotecnologie è quello biologico.

Si sta assistendo allo sviluppo di bio-sensori innovativi e di sistemi per la distribuzione intelligente di farmaci.

Sviluppare bio-sensori significa fare analisi molecolare; è necessario realizzare dispositivi in grado di interagire con molecole organiche complesse e dare segnali di riconoscimento, in tempo reale, legati al tipo di molecola e alla sua concentrazione.

Questo richiede lo sviluppo di sistemi ad alta integrazione in grado di effettuare rapidamente ed in modo automatico molteplici complessi esami biochimici.

Nell'immagine un lab-on-chip attuale; notare le ridottissime dimensioni del dispositivo.



Si tratta di una attività multidisciplinare, infatti, necessita integrare settori scientifici e tecnologici in campi molto diversi quali la micro e nano-elettronica, le micro e nano-lavorazioni, la scienza dei materiali, la fisica e la chimica delle superfici, l'informatica, la biochimica e la biologia.

Si apriranno però prospettive tecnologiche e potenzialità applicative drasticamente innovative per l'analisi del DNA, del RNA, delle proteine e di altre molecole biologiche o addirittura cellule.

I settori end-user sono quelli della terapeutica e della diagnostica biomedica, della farmacologia e delle analisi agro-alimentari.

Energia

Le ricerche nanotecnologiche nel settore dell'energia si possono riassumere in tre linee guida.

- (1) lo studio di materiali nanostrutturati per la produzione di energia fotovoltaica,
- (2) le celle a combustibile,
- (3) lo stoccaggio dell'idrogeno.

(1) Il produrre con nanotecnologie "energia fotovoltaica" vuole essenzialmente dire "copiare la natura" e produrre materiali nanostrutturati che nella cella solare simulano il processo clorofilliano presente nei vegetali.

(2) Per quel che riguarda le celle a combustibile, dispositivi che separano l'elettrone dal protone negli atomi di idrogeno e producono così una corrente elettrica, le nanotecnologie risiedono tutte nel cuore del dispositivo: "la membrana", che è responsabile della separazione dell'idrogeno in protoni e elettroni.

(3) Uno dei problemi base per l'utilizzo del combustibile idrogeno sta nello stoccaggio sicuro dell'idrogeno spesso. Le nanotecnologie sono una grande promessa con la possibilità di stoccare l'idrogeno in modo sicuro in nanostrutture quali ad esempio i nanotubi di carbonio, i materiali di



tipo zeolitico o le nanopolveri. Si tratta in tutti i casi di strutture di dimensione nanometrica che presentano superfici/volumi specifici disponibili all'intrappolamento dell'idrogeno estremamente elevati, come conseguenza della scala nanometrica del problema.

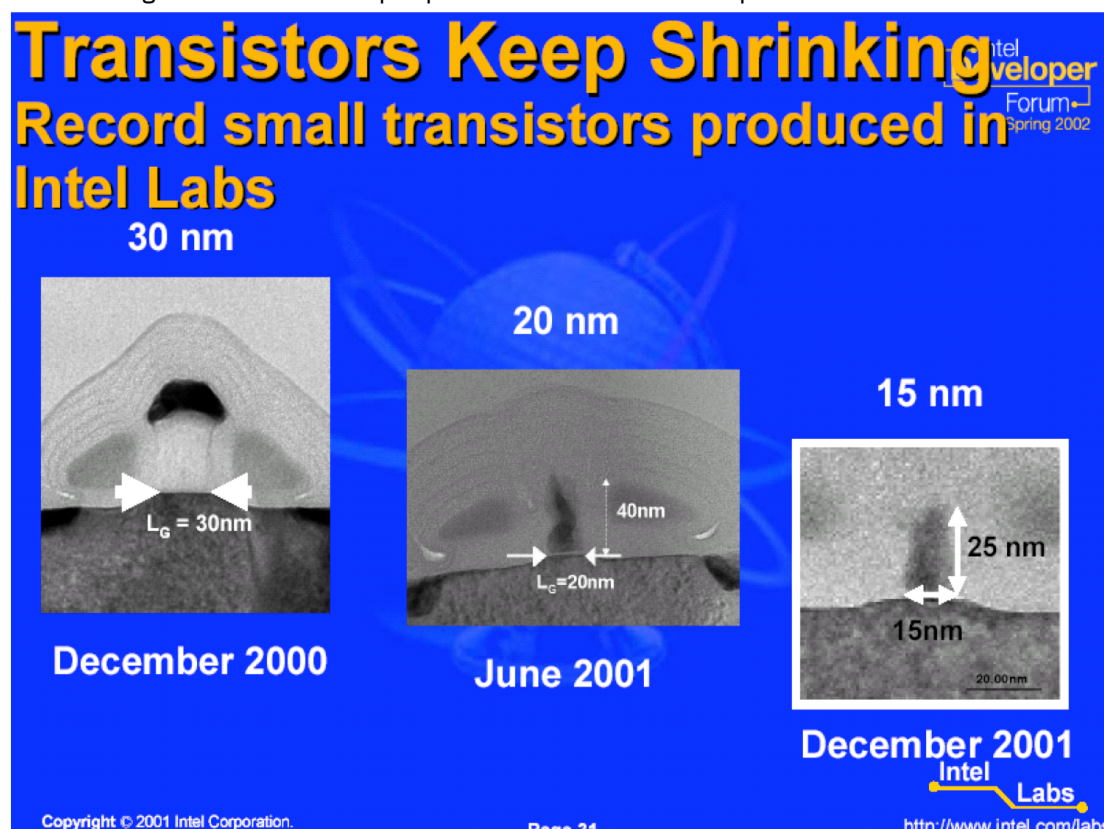
Nanoelettronica

Per quanto concerne le applicazioni nanotecnologiche al campo dell'elettronica, due sono gli assi principali lungo cui procede la ricerca, in linea con gli approcci tecnologici *top-down* e *bottom-up*; rispettivamente si tratta dell'evoluzione della microelettronica verso la nanoscala e dell'elettronica molecolare. Nel primo caso, spingendo verso limiti estremi le tecniche di riduzione dei materiali ed incisione dei circuiti (in gergo litografia), senza sostanziali cambiamenti paradigmatici nella manipolazione del flusso di materia, si sono potuti realizzare oggetti aventi dimensioni critiche.

A queste scale dimensionali la fisica classica lascia il posto alla meccanica quantistica ed un dispositivo deve essere riprogettato per funzionare correttamente – con il vantaggio di poter sfruttare una estesa gamma di nuove incredibili funzionalità.

Esempio di questa categoria di dispositivi è il SET, *single electron transistor*, un componente capace di iniettare in un volumetto nanometrico un singolo elettrone, il quale poi governerà un flusso di corrente mediante le forze coulombiane repulsive che esercita sugli altri elettroni itineranti. L'elettronica molecolare d'altro canto ha richiesto un vero e proprio break-through tecnologico, ponendosi come obiettivo lo studio delle proprietà di conduzione di singole molecole. Una singola molecola ha il vantaggio di poter essere stipata in uno spazio ridottissimo e soprattutto di essere progettata su misura per avere ben determinate caratteristiche. Diodi e transistor molecolari sono già realtà.

Nell'immagine sottostante i più piccoli transistor finora prodotti





Ambiente e nanotecnologia

Negli ultimi decenni lo sviluppo della scienza dei materiali e in particolare lo studio dei materiali nano-strutturati ha saputo rispondere oltre che ad incalzanti esigenze di carattere tecnologico anche ad una accresciuta sensibilità e ad esigenze legislative di carattere ambientale.

Per applicazioni quali ad esempio quelle dell'industria tessile, dei rivestimenti decorativi o funzionali per il settore automobilistico, **i processi chimici tradizionali a forte impatto ambientale** (processi di finissaggio o tintura, o rivestimenti galvanici) **vengono e verranno sostituiti dalle tecnologie innovative** di deposizione di film sottili in alto vuoto o da trattamenti al plasma a pressione atmosferica.

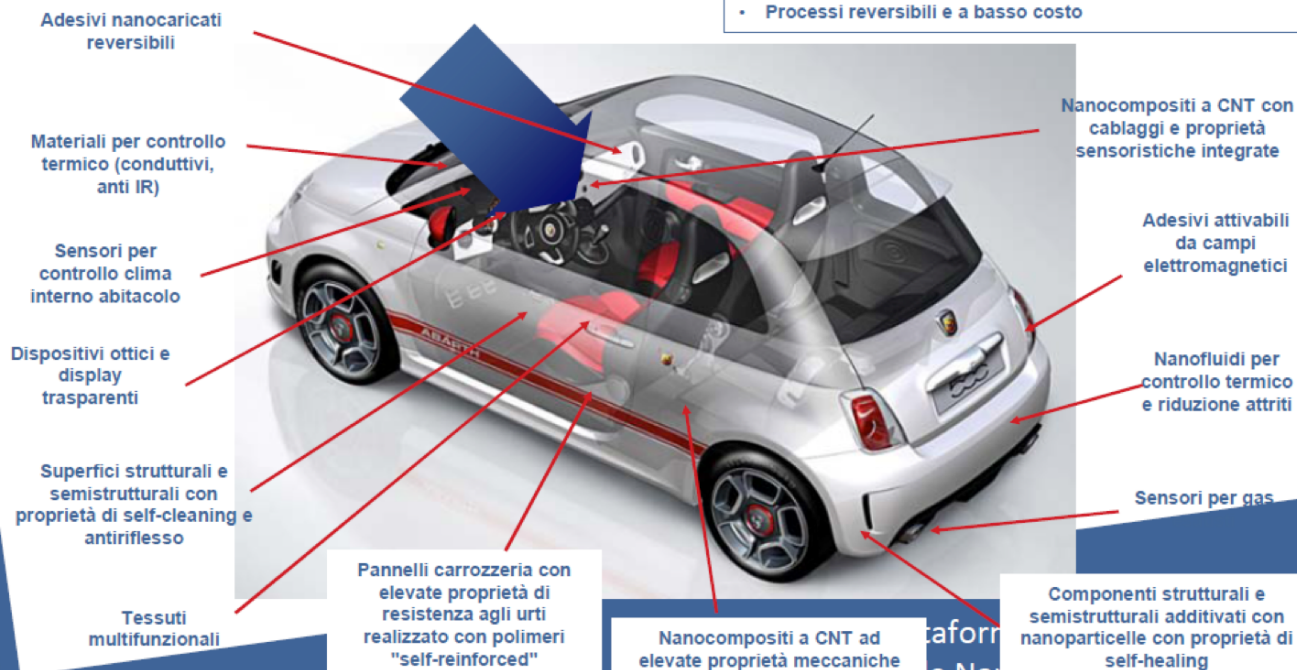
Trattamenti antimacchia, o per l'aumento della tingibilità, rivestimenti antiusura o ad elevata durezza, attivazioni superficiali per adesione tra diversi materiali (es: metalli/polimeri), o deposizioni di film polimerici con funzionalità idrofiliche o idrofobiche, deposizione di film ad alta biocompatibilità, trattamenti anti-ignifughi, film barriera ai gas. Questo incompleto elenco di proprietà possono essere ottenute attraverso trattamenti superficiali con estensione dell'ordine dei nanometri: è possibile cioè modificare l'energia e le proprietà superficiali dei materiali trattati (sia inorganici che organici) senza modificarne le proprietà massive, ottenendo proprietà stabili e prestazioni tecnologiche superiori rispetto quelle derivanti dai processi chimici tradizionali.

I materiali: nel trasporto terrestre

Il contributo delle nanotecnologie ai materiali per l'industria automotive

COMPONENTI STRUTTURALI E SEMISTRUTTURALI LEGGERI E MULTIFUNZIONALI

- Aumento comfort e sicurezza
- Riduzione pesi e ingombri
- Riduzione consumi e complessità veicoli
- Aumento dei tempi di vita di dispositivi e componenti
- Processi reversibili e a basso costo





Nano Medicina

Alzi la mano chi sa cos'è un respirocita ... Si tratta di un nanorobot teorizzato e progettato alcuni anni fa da Robert Freitas Jr. (ricercatore presso l'IBM di Palo Alto, California). Si comporta come un minuscolo serbatoio in grado di stoccare ossigeno e anidride carbonica a 1000 atmosfere, rilasciandole in modo controllato (grazie a nanosensori e nanorotori integrati nella sua struttura). Ha forma sferica, di circa un micron di diametro e uno scafo composto da atomi di carbonio, simile al diamante. Mima il globulo rosso, ma in modo potenziato: il nanorobot riesce a immagazzinare e rilasciare una quantità di ossigeno 200 volte superiore. Una soluzione salina di 5 cm³, potrebbe sostituire l'intero sistema sanguigno dell'essere umano (che mediamente ha a sua disposizione più di 5 litri di sangue). Immaginate di sottomettervi ad una "trasfusione" di un litro di respirociti: potreste smettere di respirare per circa 4 ore o sprintare alla vostra massima velocità per 15 minuti senza tirare una boccata di ossigeno!

Non è fantascienza. Si tratta della attuale visione di una delle frontiere della Nanomedicina. Una frontiera dalle potenzialità eccitanti e inebrianti, che richiede ancora molto lavoro.

Negli anni '80 e '90 la rivoluzione microtecnologica ha consentito all'uomo di costruire vetture più sicure, telefonini più piccoli, computer e dispositivi elettronici sempre più potenti e portatili. Ora la rivoluzione nanotecnologica consente di interagire con gli stessi fenomeni naturali, giocando con gli elementi ultimi della Natura: gli atomi, le molecole e le forze che li legano e li strutturano in modo coerente. La Vita, e con essa la salute e la medicina, la Nanomedicina, rappresentano le discipline applicative con gli effetti più macroscopici e affascinanti sulla nostra esistenza. Lo stesso concetto di malattia è legato ad una semplicistica idea di alterazione a livello cellulare o molecolare, indotto ad esempio da un'infezione o un'alterazione genetica. Gli scienziati di oggi stanno mettendo a punto strumenti "nanotecnologici" che interagiscono con gli elementi naturali sul loro stesso piano e con i medesimi meccanismi di interazione e assemblaggio. Ripristinando l'ordine o fornendo un'alternativa funzionale, l'uomo persegue il sogno dell'allungamento della propria esistenza, del miglioramento della qualità della vita, del bando della malattia e della sofferenza.

La Nanomedicina è un ambito in cui la tecnologia è ancora in fase di sviluppo. Quello dei nanorobot è una delle applicazioni più paradigmatiche e peraltro tra le prime ad essere postulate. I nanorobot diventeranno realtà in un futuro che probabilmente molti di noi vedranno, ma proviamo a citare alcuni frutti di questo ricco giardino di cui già oggi possiamo godere.

Dal 1998, negli Stati Uniti opera la società Second Sight, in realtà un consorzio che è dedicato allo sviluppo della "retina artificiale". Nel 2002 la FDA ha autorizzato l'impianto dei primi prototipi in 6 volontari, con evidenti e documentati successi. Ad oggi sono 18 i pazienti oggetto di sperimentazione. E' questo un esempio dei vertici che la tecnologia, nell'ambito della Nanomedicina, ha saputo raggiungere in questo avvio di millennio, in particolare nel settore dell'ingegneria tissutale. Esistono altre storie di successo, alcune già con effetti nella quotidiana pratica clinica e chirurgica, altre ancora relegate all'ambito della ricerca, ma con un promettente futuro.

Un altro settore molto vivace è quello della **somministrazione dei farmaci (drug delivery)**. Le micro e nanotecnologie offrono soluzioni alternative, meno dolorose per il paziente, con minori effetti collaterali legati all'uso estremamente localizzato e minimale del principio attivo e con un impatto socio-economico decisamente più misurato. Si va infatti dai sistemi per la somministrazione transdermica, basati su matrici di aghi micrometrici, agli apparati miniaturizzati impiantabili direttamente *in vivo*, preferiti per tutte quelle patologie che necessitano di una somministrazione frequente e controllata, per finire con "oggetti" nanometrici che fungono da vettori per quantità ridottissime di principio attivo. Si apre in questo caso la vasta prateria delle nanoparticelle e delle cosiddette "smart drugs", un esercito sconfinato di minuscoli trasportatori di farmaco progettati per viaggiare nel nostro corpo e liberare il prezioso carico al verificarsi delle condizioni programmate.

La pervasività delle nanotecnologie è quindi totale e la Nanomedicina è uno dei settori attualmente più "caldi" in assoluto. Non rappresenta soltanto un settore applicativo con interessi



e cifre da capogiro, ma anche, e soprattutto, lo strumento più potente e innovativo che l'uomo sta forgiando per produrre innovazione con effetto immediato sulla propria qualità di vita. Le ricadute scientifiche e tecnologiche avranno un profondo impatto in ciò che da sempre viene considerato il bene più prezioso per l'uomo: la propria salute e quella delle generazioni future.

Agroalimentare

I prodotti alimentari devono essere accuratamente controllati, sia per tutelarne la qualità, sia per la sicurezza del consumatore. Il controllo della qualità, la tracciabilità, lo stato di conservazione, la sofisticazione dei prodotti possono essere verificate mediante l'uso di un nano sensore selettivo per una specie chimica correlata al deterioramento o alla contaminazione dell'alimento. L'impiego di **nanosensori** altamente specifici consente di effettuare analisi in tempo reale, online lungo la catena di produzione oppure addirittura in situ sul prodotto finito.

L'introduzione di protocolli di analisi basati sui labs on chip (sensori e biosensori) garantisce vantaggi considerevoli, sia per il controllo della qualità che per la sicurezza. Mediante l'uso di queste nuove tecnologie è possibile migliorare la sensibilità delle misure e contemporaneamente diminuire in modo considerevole i tempi di esecuzione delle stesse. In particolare l'elettronica, dove possibile, dovrà essere integrata per trasferire il dato con il maggior rapporto segnale/rumore all'interfaccia data-sending e potenzialmente utilizzare protocolli di comunicazione wireless.

Altro settore di importanza strategica dove le nanotecnologie possono avere un ruolo prioritario è quello dello "smart packaging". Il ruolo del packaging alimentare si sta radicalmente trasformando da passivo, cioè semplice imballo che serve a separare il contenuto dall'esterno, ad attivo, cioè l'imballo che agisce sul prodotto e con il consumatore, diventando un sistema dinamico, dove alimento e imballo comunicano e interagiscono tra loro e con l'esterno. Lo sviluppo di soluzioni innovative anche basate sulle nanotecnologie per lo smart packaging dei prodotti alimentari, risponde ad una serie molto ampia di esigenze lungo l'intera filiera agroalimentare, dalla produzione, alla distribuzione, passando per i processi di trasformazione, conservazione e trasporto.

Le nanotecnologie: etica e società

Da sempre l'importanza di un paradigma scientifico, inteso come insieme di modelli e metodi per la scienza e la tecnologia, comprensivo della chiave di lettura dell'intero pacchetto, è stata localizzata nel suo valore euristico. Come si inquadra, all'interno di un modello filosofico con capacità euristiche, la rivoluzione nanotecnologica? E' sempre valido il vecchio paradigma riduzionistico che vede come positiva la frammentazione delle ricerche in innumerevoli direzioni, al fine di moltiplicare le possibilità di successo? Ed al fine di andare a carpire il segreto ultimo della conoscenza in ciò che è inscindibile ed invisibile, e che Leucippo e Democrito chiamarono $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\nu$, 2500 anni fa? Probabilmente il riduzionismo è inappropriato per descrivere la convergenza NBIC [*Nano, Bio, Info, Cogno*], la quale richiede piuttosto una visione olistica, il sistema scientifico essendosi riorganizzato oggi in una sovrastruttura dalle molteplici connessioni interne. E questo sia su scala locale, con gruppi di ricerca formati da depositari di conoscenze estremamente eterogenee, sia su scala globale, grazie alla rete di comunicazione cui si appoggia la ricerca moderna. Tuttavia una visione olistica *stricto sensu* considera l'insieme delle discipline come somma algebrica delle singole componenti, non tenendo conto dell'importanza e della complessità che sorge quando si hanno molteplici possibilità combinatorie non equivalenti. E non tenendo conto del fatto che le relazioni sociali sono fortemente nonlineari, prestandosi in alcuni casi ad uno scambio ricorsivo come quello che avviene tra fisici teorici e sperimentali! E' stato pertanto proposto di guardare alla nuova scienza ed alla nuova tecnologia con occhi diversi, secondo un approccio sistemico (George Khushf, *A Hierarchical Architecture for Nano-scale Science and Technology*) che tenga conto della gerarchia delle varie discipline fermo restando la possibilità di avere contaminazioni e flusso di informazione sia verticali sia



trasversali tra campi della conoscenza. La gerarchizzazione delle discipline discende dalla speculazione riduzionistica, che muovendosi in direzione dei fondamenti ultimi della natura, pose la fisica alla base di una piramide rovesciata, la quale procedeva allargandosi verso la chimica, la biologia, l'etologia, la sociologia, fino alla cosmologia. E di pari passo si andavano incrementando le dimensioni oggetto dello studio, nonché la scala temporale dei fenomeni investigati. Merito della rivoluzione nanotecnologica è stato quello di farci compiere un passo ulteriore nella rappresentazione paradigmatica delle scienze: fisica, chimica e biologia hanno pari dignità in detta piramide, scaturendo tutte e tre dalla medesima scala dimensionale.

Una volta descritto il contesto paradigmatico all'interno del quale potremmo inserire la *nanoscitech*, cerchiamo di analizzare con maggior dettaglio la portata dei cambiamenti cui potremmo assistere.

Una tra le maggiori sfide concettuali che la società dovrà affrontare in seguito alla rivoluzione nanotecnologica verrà consumata sul piano etico, così infinitamente lontano dalle fucine di Vulcano ove vengono partorite le nanomacchine. Conseguenza diretta nella semantica: si opererà la revisione di alcuni concetti fondamentali del vivere, quali "natura", "tecnologia", "sintetico" od "artificiale", "immagine", "osservazione", "scienziato" od "esperto". Vediamoli in dettaglio, ad uno ad uno.

Andando con ordine, nel IV secolo a.C. Aristotele definì naturale tutto ciò che contenesse in sé una sorgente di cambiamento e di continuità. Gli automi erano creature meccaniche, sorprendenti ma concrete e finitamente visibili. Cosa dovremmo dire oggi? Abbiamo imparato a copiare la natura, che da molto più tempo di noi si esercita nell'estetica dell'efficienza, nella selezione di quella che un ingegnere chiamerebbe configurazione ottimale, un matematico forma più elegante, un artista armonia. Abbiamo spinto lo sguardo oltre il limite naturale servendoci di macchine per costruire altre macchine sempre più piccole. Ed infine quella logica che sembrava essere un estremo e folle gioco di presunzione si è rivelata essere la base della fisiologia della vita, da sempre. Un folle gioco Lego™ molecolare, con il quale potremo realizzare un tessuto ove trama ed ordito sono ciò che fino a poco fa chiamavamo naturale ed artificiale. *Nanoscitech* ha prodotto nuovi automi, impalpabili ed invisibili, forse molto più accettabili per questa ragione, molto più simili a noi nel loro funzionamento. Appunto, invisibili. Le immagini che raffigurano gli infiniti abitanti del nanomondo non hanno nulla a che vedere con le fotografie, sono una semplice rappresentazione intermedia comprensibile ed interpretabile dall'essere umano ma ritratta con gli espedienti fisici più svariati (fasci di particelle, fasci di elettroni, stili oscillanti, ecc.). Magritte accompagnò la sua opera *Euclidean* con la scritta "Ceci n'est pas un pipe", a voler sottolineare il fatto che un'immagine costituisce una rappresentazione, non un oggetto in sé. E' difficile da accettare, molto meno provocanti sono le istantanee di un cosmo lontano che ci giungono per mezzo di potenti radiotelescopi, oppure il famoso logo IBM scolpito negli atomi ed immortalato campionando le superfici a densità di probabilità elettronica costante mediante un AFM. Tutto ciò è già stato interiorizzato dalla società, rivisto il significato di osservazione.

Ma qual è il ruolo del Nuovo Prometeo che dona all'umanità la nanotecnologia? Esattamente come il fuoco della mitologia, se non la si sa usare correttamente, si rischia di perderne il controllo; se invece se ne conosce il potere e si impara a domarlo, ecco che il fuoco entra in tutte le case e porta calore, luce, sicurezza e conforto. L'impatto sulla società potrebbe essere così profondo che l'esperto *nanoscitech* costituirà un elemento antidemocratico, non essendo il cittadino medio in grado di decidere autonomamente come comportarsi di fronte ad una nuova porta che potrebbe aprirsi. Tuttavia essendo la *nanoscitech* materia giovane e tremendamente interdisciplinare, la società non ha ancora eletto esperti unanimemente riconosciuti, in grado di condensare sia competenza tecnica sia capacità di astrazione a tutto tondo che possano portare a previsioni sensate relative all'impatto di una nuova linea di ricerca. Tra gli esperti più noti, Eric Drexler, Ralph Merkle, Richard Smalley, ciascuno di questi è stato duramente criticato e tacciato di incompetenza. Troppo spesso l'esperto non si esercita nella comunicazione, assumendo piuttosto uno scomodo comportamento "autoritario, paternalistico e profondamente non-democratico" (E. Munn Sanchez, *The expert's role in nanoscience and technology*). Insomma, ancora una volta dovremo lavorare al miglioramento di un aspetto della vita sociale che poco ha



a che spartire con scienza e tecnologia, se non quando il rapporto tra quella e queste è di dipendenza assoluta: il processo decisionale democratico!

“...la tecnica non è più oggetto di una nostra scelta, ma è il nostro ambiente, dove fini e mezzi, scopi e ideazioni, condotte, azioni e passioni, persino sogni e desideri sono tecnicamente articolati ed hanno bisogno della tecnica per esprimersi.

Per questo abitiamo la tecnica irrimediabilmente e senza scelta.”

U. Galimberti, *“Psiche e techne – L'uomo nell'età della tecnica”*, Feltrinelli 1999.

Le nanotecnologie fanno paura ?

Le nanotecnologie rappresentano un campo di studio le cui applicazioni possono condurre a rivoluzionarie scoperte in campo scientifico e tecnologico. Tuttavia se da un lato i benefici che questa tecnologia potrebbe produrre sono enormi, dall'altro esistono pericoli difficili da visualizzare al momento ma comunque tutti derivanti dal potere radicale di questo nuovo strumento. Sebbene la manipolazione su scala atomica, in tutte le sue forme, offra infatti un potenziale mai visto, anche i più grandi sostenitori di queste tecnologie temono che i nanomateriali possano nascondere colossali pericoli.

Già uno dei padri-pionieri delle nanotecnologie, Eric Drexler, in *“Engines Of Creation”*, descriveva la possibilità che dei nanoorganismi creati artificialmente, chiamati *“green goo”*, possano provocare la replicazione dei *“pink goo”*, cioè degli esseri umani, provocando la crescita zero della popolazione umana e la loro relativa distruzione. Dietro la sensazionalità di questi fantascenari, vi è un pericolo reale: Drexler avvertiva che i nanoorganismi arriveranno a competere e a confondersi con le forme di vita naturali.

Ciò che non si conosce della tecnologia atomica pone infatti rischi incalcolabili, che vanno dalla contaminazione ambientale, ai rischi per la salute, alla costruzione di nuove armi di distruzione di massa.

In campo sanitario la grande preoccupazione che fa discutere i nanotecnologi è il timore che le nanoparticelle possano penetrare nel corpo umano e provocare danni sconosciuti. Gli organismi umani sono sempre stati esposti a una grande quantità di nanoparticelle con le quali il nostro corpo ha imparato a convivere. La paura è che uno sviluppo delle nanotecnologie e di produzioni industriali ad esse correlate determini la creazione di nuove particelle con pericolose conseguenze per la salute. Dove le nanoparticelle sono saldamente fissate su un materiale di supporto, come ad esempio la vernice delle automobili, i prodotti suscitano meno timori rispetto al caso in cui le nanoparticelle si muovono liberamente nell'ambiente. Queste nanoparticelle libere possono essere inalate attraverso i polmoni o essere assorbite attraverso la pelle. Se oggi molte particelle provocano le patologie respiratorie più diverse, come asma o patologie cardiovascolari, domani la diffusione delle nanotecnologie potrebbe moltiplicare questi effetti dannosi.

Anche per quanto concerne l'impatto ambientale vi sono molti punti in sospeso in relazione a un possibile rischio per l'ambiente attribuibile alle nanoparticelle e ai prodotti nanotecnici. Molte particelle di sintesi sono sconosciute all'ambiente per tipo e quantità. Esse potrebbero costituire una nuova classe di sostanze nocive e non biodegradabili. Un esempio è la nanoparticella di ossido di alluminio. Secondo un recente rapporto di uno scienziato ambientale del New Jersey Institute of Technology (NJIT), pubblicato recentemente su *“Toxicology Letters”*, le nanoparticelle di ossido di alluminio rallentano la crescita delle radici in cinque specie di piante: mais, cetriolo, cavolo, carota e soia. Le nanoparticelle di ossido di alluminio sono comunemente usate per strati resistenti alle abrasioni, per lozioni solari che forniscono protezione dai raggi ultravioletti e catalizzatori ambientali che riducono l'inquinamento. *“Prima di questo studio si consideravano le piante totalmente immuni dalle nanoparticelle, invece abbiamo dimostrato che i semi possono interagire con nanoparticelle come quelle dell'ossido di alluminio, che rallentano e danneggiano il processo di crescita”* dice Daniel J. Watts, del NJIT, autore dello studio. Nel mondo reale, le



nanoparticelle possono trovarsi nell'aria, provenienti dai tubi di scappamento, da ciminiera, o da canne fumarie, possono mixarsi con la pioggia e con la neve, e quindi giungere al terreno.

Pure l'applicazione delle nanotecnologie al campo bellico può prefigurarsi come una pericolosissima miscela. Esse infatti non solo permetterebbero di costruire armi convenzionali più distruttive ad un costo ridotto, ma anche armi di distruzione di massa che si auto-replicano, come fanno i virus quando attaccano il corpo umano. Due esempi ne sono i forti investimenti dello stato di Israele e degli Stati Uniti in progetti finalizzati alla realizzazione di innovativi mezzi bellici. Lo stato ebraico sta finanziando un progetto per la realizzazione di un "calabrone bionico", una nuova forma di robot-killer dalle capacità inedite: assemblati con pezzi piccoli quanto un milionesimo di millimetro tali nanoarmi dovrebbero essere in grado di fronteggiare i missili palestinesi, capaci di intercettare attentatori suicidi ed efficienti nel contrastare le tattiche di guerra più striscianti. Gli Stati Uniti invece già producono il "wasp" un micro mezzo aereo di 41 centimetri e di soli 275 grammi di peso, già in ricognizione in Afghanistan. Si controlla con un radiocomando ed è quasi impercettibile tanto da potersi avvicinare all'obiettivo senza essere notato. Esso è in grado di insinuarsi negli accampamenti nemici dove può rilasciare agenti contaminanti o materiale esplosivo.

Ripercussioni socio-politico-economiche

Lo sviluppo delle nanotecnologie condurrà a inevitabili conseguenze socio economiche. La più importante fra queste potrebbe essere l'accesso a nuovi mezzi e risorse con effetto sulle conflittualità politiche, economiche e sociali che regnano sovrane fra alcuni stati e al loro interno tra diversi strati di popolazione. Esistono alcuni conflitti che potrebbero infatti essere suscettibili di risoluzione tecnologica. Uno dei più comuni fattori che contribuiscono alla guerra fra stati è l'accesso alle risorse. La storia è costellata da esempi di guerre combattute per le risorse, in particolar modo oro e petrolio. La nanotecnologia potrebbe aiutare ad alleviare e forse completamente risolvere, il problema dell'accesso a certi materiali. Il petrolio, per esempio, potrebbe fare la stessa fine che ha fatto l'olio di balena all'inizio del ventesimo secolo, ossia "eclissato" da una nuova sorgente di energia, ovvero l'energia solare. Grazie all'incremento dell'efficienza di raccolta dell'energia solare, nonché della contemporanea riduzione dei requisiti di alimentazione energetica per la manifattura, la nanotecnologia potrebbe rendere l'energia solare una sorgente di energia sufficiente sia per l'uso domestico che industriale, creando così una alternativa percorribile e persino desiderabile, all'uso di combustibili fossili. Esiste anche la possibilità che per alcuni compiti, i processi di manifattura molecolare possano anche produrre energia piuttosto che consumarne.

Se una tale situazione dovesse realizzarsi, le implicazioni per la riduzione della conflittualità fra stati sarebbero assai significative. L'attuabilità dell'alimentazione energetica solare determinerebbe l'indipendenza energetica per tutti e lascerebbe agli stati del mondo solo pochi altri interessi vitali da difendere e quindi meno motivi per ingaggiare guerre. Si pensi quali panorami e orizzonti aprirebbe un processo simile in campo ambientale, sociale e economico.

Esistono altre aree di risorse in cui la nanotecnologia molecolare potrebbe contribuire ad una riduzione dei conflitti fra stati. In particolar modo una di tali aree è quella del cibo. Un esempio di conflitto per il cibo, isolato e di scarsa intensità (nonché oramai divenuto molto comune) è quello verificatosi nel 1995, quando Canada e Spagna si scontrarono per le attività spagnole di pesca al largo delle coste del Canada. All'assottigliarsi della popolazione di pesce, causata dalla pesca intensiva, dovremmo attenderci un incremento dell'adozione di pratiche di pesca più aggressive, nonché un concomitante insorgere di conflitti riguardanti la sovranità sui siti di pesca. La nanotecnologia molecolare, comunque, potrebbe consentire la generazione non dispendiosa di tutto il pesce che la razza umana può consumare e senza che venga spesa una sola ora per pescare. La sovranità sulle acque di pesca migliori dovrebbe diventare un non-problema. Questo esempio, apparentemente triviale, è importante perché evidenzia che la nanotecnologia molecolare potrebbe aiutare ad alleviare i conflitti riguardanti quelle risorse materiali che sono di



tipo non-esclusivo (ossia: risorse che possono essere consumate da molti allo stesso tempo, come lo sono il cibo, l'acqua e i beni prodotti in massa)

La ricerca in Italia

Tra le iniziative di maggior peso e respiro per il sostegno dell'innovazione "nanotecnologica" in Italia, segnaliamo quella adottata nel 2005 dal MIUR attraverso lo strumento di finanziamento alla ricerca costituito dai fondi FIRB. Vennero allora finanziate 4 iniziative nell'area scientifica delle Nanobiotecnologie per dispositivi e sensori innovativi per la genomica e la post-genomica, 4 Laboratori Nazionali pubblico-privato che vennero potenziati o generati attraverso il bando. Le localizzazioni di riferimento sono Genova (Università degli Studi), Lecce (Lab. Nazionale di Nanotecnologia, NNL), Venezia (Associazione ABO Oncologia) e Torino (Politecnico).

L'ultimo Laboratorio venne successivamente denominato Latemar (www.latemar.polito.it).

Ci soffermiamo sulla sua descrizione perché emblematico della sinergia possibile in Nanomedicina (e non solo) e perché esempio di come si può valorizzare un patrimonio tecnico-scientifico già esistente. Il Laboratorio è una struttura distribuita sul territorio nazionale. 13 partner, sia pubblici che privati, hanno scelto una formula originale: condividere le proprie competenze e le proprie strutture per sviluppare innovazione di livello internazionale nei settori della genomica e della post-genomica, attraverso l'adozione di strumenti micro e nanotecnologici. Oggi Latemar è al quarto anno di attività. Ha portato avanti 8 linee di ricerca (dai Lab-on-a-chip, alla sensoristica avanzata e integrata nella microfluidica, alle tecniche di caratterizzazione innovative), con risultati testimoniati da oltre 60 pubblicazioni su riviste internazionali, oltre 70 interventi in Conferenze, alcuni brevetti e la creazione di spin-off che si accingono a sfruttare commercialmente i prodotti della ricerca. Ha assunto e formato con contenuti fortemente interdisciplinari più di 20 giovani ricercatori. Dal 2009 organizza la Alp Nanobio International School (ANIS, <http://m2b2.fbk.eu/anis1>), una Scuola di Formazione Internazionale sulle nano-biotecnologie. L'efficace coordinamento del Prof. Pirri del Politecnico di Torino, unito alla fattiva collaborazione e operatività degli altri partner, disponibili ad una piccola perdita di autonomia scientifica e di ricerca per l'interesse della comunità del Laboratorio, hanno dimostrato come un esperimento originale si possa trasformare in una realtà in grado di maturare e di produrre ricerca e trasferimento tecnologico di livello internazionale, con ricadute sul tessuto produttivo e sull'impiego di valore di giovani talenti.

Nanotecnologie: gli investimenti

Le nanotecnologie sono unanimemente considerate uno dei fattori trainanti dell'attuale sviluppo tecnologico e le attività nel settore stanno crescendo in tutto il mondo negli ultimi 10 anni. Gli sforzi principali sono spati supportati dapprima da interventi pubblici e in seguito da ingenti investimenti privati. Prendiamo ad esempio gli USA, uno dei principali attori del settore, gli investimenti pubblici sono passati dai 116 milioni di \$ del 1997 ai 1,49 bilioni di \$ del 2008 gestiti prevalentemente dalla National Science Foundation, dal Department of Defense e dal Department of Energy, attraverso il programma di coordinamento denominato National Nanotechnology Initiative nei settori applicative dell'aerospazio, difesa e intelligence, produzione e distribuzione dell'energia e computing. Nel 2009 l'Amministrazione Obama ha deciso di potenziare ulteriormente gli investimenti pubblici nel settore per aiutare il rilancio dell'economia americana.

Anche gli altri paesi dell'area G8 hanno seguito un trend simile. Il Giappone ha visto un incremento dai 120 milioni di \$ del 1997 ad 1 bilione di \$ del 2005. L'Europa è passata dai 150 milioni di \$ del 1997 ai 1,1 bilioni di dollari del 2005. Riferendosi agli investimenti dei paesi emergenti in particolare Corea, India, Cina e Russia si vedono poi investimenti pubblici che sono passati dai 70 milioni di \$ del 1997 ad 1 bilione di \$ del 2006,

Un altro canale di finanziamento è il "venture capital", che agisce sulle start up nanotech. Il sistema di venture capital ha finanziato in USA numerose compagnie nanotech soprattutto nei



settori dei materiali, della ICT, dei MEMS e delle nano-biotecnologie. I principali investitori negli USA sono stati Harris & Harris, Lux Capital and Draper Fisher Jurvetson con importi che dai 385 milioni di \$ del 2002 sono passati ai 738 milioni di \$ del 2007.

Secondo dati dell'American Stock Exchange i valori prezzati dagli indici delle aziende nanotech sono nel range 1600-1200 \$ nel periodo maggio 2007 – maggio 2008 per le aziende che hanno come riferimento il Lux Nanotech Index, sono nel range 150-200 \$ nel periodo maggio – dicembre 2007 per le aziende che hanno come riferimento il Merrill Lynch Nanotech Index. Entrambi gli indici sono valutati prendendo a base di riferimento circa 20 aziende leader nel settore.

Riassumendo, su scala mondiale gli investimenti pubblici nel settore delle nanotecnologie sono saliti dai 432 milioni di \$ del 1997 ai 11,2 bilioni di \$ del 2006 secondo dati della Lux Research nel suo report "The Nanotech Report 5th Edition."

Veniamo adesso alla situazione italiana. Secondo lo studio dell'AIRI pubblicato nel 2007 l'investimento pubblico in Italia nel 2005 è stato di circa 60 milioni di Euro a cui si debbono aggiungere circa 40 milioni di Euro di provenienza EU. Le nanotecnologie sono state incluse tra le priorità del Piano Nazionale di Ricerca per il periodo 2005-2007 e si è assistito ad un graduale aumento delle risorse investite, difficilmente valutabili in un contesto nazionale dove i canali di finanziamento alla ricerca sono enormemente frammentati e privi di un inventario generale. Secondo lo studio dell'AIRI sono operative in Italia circa 160 strutture di ricerca che vedono tra le loro priorità le nanotecnologie. Di queste strutture il 60% è pubblico, mentre il rimanente 40% privato. Il settore pubblico vede circa 1900 operatori contro i 2360 dichiarati dal settore privato. In particolare nel triennio 2004-2007 sono stati istituiti 7 Centri di Eccellenza Nazionali operanti su temi nanotech, che affiancano 5 Distretti Tecnologici, 33 strutture universitarie e 21 laboratori del CNR. Da una analisi della distribuzione geografica delle strutture sia pubbliche che private operanti nel settore nanotech, traspare che la stragande maggioranza è concentrata in Lombardia, Piemonte, Veneto ed Emilia Romagna con in predominanza dell'asse Torino-Milano attorno al quale si concentra il grosso dell'industria e dell'attività di ricerca in stretto contatto con i poli svizzeri di Losanna, Zurigo e Neuchatel e francesi di Grenoble e Lione.



scienza attiva