

Gianfranco Pacchioni

Quanto è piccolo il mondo

Sorprese e speranze dalle nanotecnologie

Chiavi di lettura a cura di
Lisa Vozza e Federico Tibone

indice

<i>Introduzione</i>	5
1. Visionari in azione	9
Una rivoluzione annunciata «C'è un sacco di posto là sotto»	
2. Quanto grande è «grande» e quanto piccolo è «piccolo»	21
Un numero con una lunga storia Colloidi, cluster e altro Un mondo tutto speciale Costruire «atomi artificiali»?	
3. Architetture di carbonio	43
Un pallone di atomi Nanotubi e nanofili Una scoperta casuale o «cercata»?	
4. Vedere per credere	61
L'«effetto tunnel» Vedere l'invisibile A pesca di atomi Un sistema Braille atomico Insegnare a un millepiedi a scrivere	
5. Dal transistor al computer quantistico	87
Verso la miniaturizzazione La legge di Moore e il futuro del computer L'elettronica molecolare Calcolare con gli atomi	

6. Particelle impalpabili	113
Nanocatalizzatori	
Un atomo in più fa la differenza	
Le superfici autopulenti	
Le tante applicazioni delle nanoparticelle	
7. Piccolo è bello: il mondo delle nanostrutture	129
Energia a prezzo di saldo	
Non solo «pieni» ma anche «vuoti»	
Il combustibile del futuro	
«Millefoglie» speciali	
I supporti magnetici	
La promessa dei magneti molecolari	
8. Nano e bio: due mondi si incontrano	157
Proiettili magici	
Come «cuocere» le cellule malate	
Bussole naturali	
Il laboratorio tascabile	
Imparare dalla natura	
Calcolare con il DNA	
9. Luci e ombre: i rischi delle nanotecnologie	179
Una storia controversa	
Ha ragione Beppe Grillo?	
La nano-tossicologia	
Apocalisse	
10. Nanomacchine e nanorobot	195
Macchine della creazione	
Nano-macchine in natura	
«Replicare» la natura	
Supermolecole	
Bibliografia	213
Indice analitico	219

Introduzione

Scrivere oggi un libro sulle nanotecnologie è un po' come stendere il resoconto di un viaggio intorno al mondo in barca a vela appena una settimana dopo essere partiti.

Sappiamo molto sulle tecniche di navigazione e sul modo di sfruttare i venti, conosciamo i dettagli del progetto dello scafo, i materiali avanzati usati per le vele, i sofisticati sistemi di orientamento. Possiamo descrivere la rotta presunta e il percorso che abbiamo seguito finora. E conosciamo le previsioni atmosferiche per i prossimi cinque giorni.

Ma su quanto durerà il viaggio, se incontrerà lunghi periodi di bonaccia o viaggerà invece filato con gli alisei in poppa, se sarà ostacolato o addirittura interrotto da violente burrasche, se dovrà confrontarsi con scuffiate, rotture dell'albero o del timone, be', su tutto questo non possiamo che speculare, immaginare, sperare.

Così è anche per le nanotecnologie: parlandone è inevitabile mescolare le certezze sui progressi già fatti alle speranze sul destino che ci aspetta. Persino l'obiettivo finale, raggiungere il porto di arrivo dopo aver circumnavigato il globo, è fragile, incerto, estremamente ambizioso. E non privo di rischi. Se però riusciremo nell'impresa, allora saremo più forti, sicuri e determinati.

Tra cinque o dieci anni, in altre parole, questo libro potrebbe avere una struttura assai diversa. Stiamo per parlare insomma di qualcosa che è in evoluzione rapida e tumultuosa, e per giunta lo faremo dal punto di vista dell'osservatore interno, che come si sa non è mai troppo obiettivo né distaccato.

Inoltre questo non è né vuole essere un manuale per addetti ai lavori. È un'opera di divulgazione che ha lo scopo di aiutare a capire – e magari di invogliare ad approfondire – questa nuova disciplina. Con tutti i limiti che ciò comporta. Il primo è che per parlare di nanotecnologie oggi è indispensabile trasformarsi in tuttologi, ossia esperti di tutto, il che spesso vuol dire anche di niente.

Il problema è che le nanotecnologie sono per loro natura fortemente interdisciplinari: utilizzano concetti che vengono dalla fisica e dalla chimica, dalla biologia e dalla scienza dei materiali, dalla medicina e dall'informatica, perfino dalla bioetica. Alcune di queste materie le frequento da vicino e da lungo tempo, con altre sono venuto a contatto soltanto in anni recenti per via della mia professione, di altre ancora ho una conoscenza superficiale e limitata alla lettura di testi o a chiacchierate con colleghi.

Perciò l'equilibrio tra le varie parti del libro forse non sarà sempre perfetto. D'altra parte la purezza e la perfezione non esistono se non come concetti estremi, e se esistono non sono necessariamente desiderabili. Spero che di «impurezze» nel libro non ce ne siano troppe, ma pensare che non ce ne siano affatto sarebbe pura presunzione.

Troverete che ogni capitolo è preceduto da un breve brano, un frammento di testo in tema con l'argomento e tratto dai racconti di Primo Levi, chimico e scrittore. Il motivo è che se c'è una persona che ha avvertito con straordinaria sensibilità il potenziale e anche il pericolo delle nuove tecnologie e ha saputo mirabilmente testimoniarlo e trasmetterlo agli altri attraverso i suoi scritti, questi è proprio Primo Levi.

In alcuni dei suoi racconti ha lucidamente previsto cose che in quel momento potevano sembrare fantascienza, ma che erano alla portata dell'uomo e infatti sono state poi scoperte o realizzate: le moderne tecniche di manipolazione genetica e di clonazione, la realtà virtuale, i progressi della medicina e, perché no, anche delle nanotecnologie (che ancora non avevano questo nome).

Gli spunti di Primo Levi, oltre a fornire un elemento di riflessione su uno scrittore che ci ha detto tantissimo anche al di là delle sue opere più famose, sono un monito che attraversa tutto il libro e ci invitano a non dimenticare che, per quanto potenti e spettacolari possano essere le conquiste della tecnologia, esse devono sempre mettere al centro l'Uomo, senza renderlo schiavo.

Visionari in azione

Se comprendere vale farsi un'immagine, non ci faremo mai un'immagine di uno happening la cui scala è il milionesimo di millimetro, il cui ritmo è il milionesimo di secondo, ed i cui attori sono per loro essenza invisibili. Ogni descrizione verbale sarà mancante, ed una verità varrà l'altra.

Primo Levi, «Carbonio»,
in *Il sistema periodico*

Descrivere e immaginare il modo in cui avvengono le cose al livello più basso, quello degli atomi e delle molecole, ossia della materia sulla scala più piccola, è impresa ardua e forse impossibile. Troppo distanti dalla nostra esperienza quotidiana i modi in cui gli oggetti più piccoli si muovono, si aggregano, si dividono. Troppo diversi i tempi enormemente rapidi in cui le cose avvengono. Troppo «improbabili», contrarie al senso comune, le leggi a cui questi fenomeni obbediscono.

Eppure in qualche modo dovremo pure provare. Perché è proprio su queste sofisticate danze a livello atomico, sulle affinità elettive o sulle antipatie tra le molecole che si fondano le nostre speranze di manipolare a piacimento la materia, sviluppando potenzialità che oggi neppure immaginiamo. Proprio su capacità di questo tipo si basano le *nanotecnologie*, un insieme di tecniche e di processi che si è sviluppato negli ultimi decenni e ha acquistato importanza

sempre maggiore nel panorama delle nostre conoscenze scientifiche e tecnologiche.

Molte di queste potenzialità Primo Levi le aveva già intraviste ben prima che si cominciasse a parlare di nanotecnologie. C'è un racconto in particolare, «L'ordine a buon mercato» nelle *Storie Naturali* degli anni Sessanta, che mi ha sempre affascinato perché presenta l'idea di una macchina spettacolare, il Mimete.

Il Mimete assomiglia a una banale fotocopiatrice ma è stato pensato per *replicare* un documento, non solamente per ricopiarlo. È un vero e proprio duplicatore:

Il principio stesso su cui si fonda è una novità rivoluzionaria, di estremo interesse non solo pratico, ma concettuale. Non imita, non simula: ma riproduce il modello, lo ricrea identico, per così dire dal nulla... Beh non proprio dal nulla, intendevo dire dal caos, dal disordine assoluto. Ecco, questo fa il Mimete: crea ordine dal disordine.

Pescando a piacere atomi e frammenti molecolari da un serbatoio di alimentazione, il Mimete esegue una scansione dell'oggetto da duplicare per poi riprodurlo fedelmente:

Durante il processo di duplicazione, nella esatta posizione di ogni singolo atomo del modello viene fissato un atomo analogo estratto dalla miscela di alimentazione: carbonio dov'era carbonio, azoto dov'era azoto e così via. [...] Si trattava veramente di una tecnica rivoluzionaria: la sintesi organica a bassa temperatura e pressione, l'ordine dal disordine in silenzio, rapidamente e a buon mercato: il sogno di quattro generazioni di chimici.

Vedremo più avanti come questa idea, apparentemente banale, rappresenti invece uno dei temi centrali delle nanotecnologie: la possibilità di aggregare e disporre gli atomi a nostro piacimento per costruire qualcosa «dal basso», usando mattoncini men che microscopici in modo semplice ed efficace. Una specie di Lego che si costruisce da solo, seguendo le istruzioni precise contenute nella scatola di montaggio.

Protagonista del racconto di Levi è Gilberto, uno stralunato personaggio tra il credulone e l'inventore, che impiega poco per incominciare a divertirsi con il nuovo «giocattolo».

Inizia duplicando un dado da gioco, una zolletta di zucchero, un fazzoletto, un orario ferroviario, insomma tutto quello che gli capita a tiro. Prova poi con un uovo sodo, ma il guscio risulta sottile e inconsistente (per mancanza di calcio, conclude giudiziosamente Gilberto). Quindi viene il momento di fagioli, piselli, qualche bulbo, ed ecco che il grande salto è maturo.

Se posso duplicare un fagiolo, si chiede Gilberto, perché allora non provare con un ragno o un insetto? Davvero il Mimete riuscirà a fare una copia della vita, della materia animata, con tutti i suoi complessi meccanismi?

Preso una lucertola, la mette nel duplicatore e via:

Il suo doppio era esteriormente normale, ma quando lo riportai a temperatura ambiente notai che si muoveva con grande difficoltà. Morì in poche ore, e potei constatare che il suo scheletro era assai debole: in specie le ossa lunghe delle zampe erano flessibili come la gomma.

Bastano questi cenni per individuare alcuni elementi fondamentali, in parte entusiasmanti in parte inquietanti, di quella grande rivoluzione di cui molto si parla oggi e che va sotto il nome di nanotecnologia. Come dicevamo, infatti, l'ordine a buon mercato è un po' il fine ultimo di tutta la nanotecnologia.

Ma si sa: come non c'è medaglia senza rovescio, così non c'è attività umana senza rischi, e di fronte a ogni rivoluzione si pongono limiti etici e questioni di fondo. Dove e quando occorre fermarsi?

Primo Levi intravede al tempo stesso l'enorme potenzialità della nuova tecnologia ma anche i rischi e i problemi legati alle sue conseguenze.

La storia di Gilberto è infatti la storia della nostra insaziabile voglia di esplorare e provare cose nuove, della nostra meraviglia davanti ai prodigi della tecnica, ma anche del nostro sentimento di onnipotenza quando pensiamo di poter controllare e manipolare la natura.

È l'insieme dei dubbi che ci assalgono quando ci troviamo di fronte a percorsi inesplorati e forse pericolosi, quando la sfida va oltre il principio tecnico e mette in gioco i meccanismi stessi della creazione, scardina l'ordine naturale per sostituirlo con uno nuovo e sconosciuto.

Gilberto siamo noi, e come noi infatti egli non si accontenta, non si arresta. La sua curiosità, il suo desiderio di sperimentare sono più forti dei principi etici, dei problemi a cui potrebbe andare incontro. Se posso duplicare una lucertola, si chiede Gilberto, allora perché non una persona?

Detto fatto: con qualche ritocco e alcune bombole di elementi più rari il Mimete è pronto, non resta che trovare la cavia.

La scelta, quasi obbligata, cade sull'amatissima moglie Emma. Gilberto la addormenta, la infila nel nuovo macchinario e in qualche ora di processo sintetico ne crea una copia perfetta, un clone in tutto e per tutto identico all'originale.

Nasce così Emma II, il primo essere umano assemblato per via sintetica, partendo dai singoli atomi.

Era nata dormendo, poiché il Mimete aveva duplicato anche il sonnifero che correva per le vene di Emma I, e si era svegliata sapendo di essere Emma Perosa in Gatti, unica moglie del ragioniere Gilberto Gatti. Ricordava bene tutto quanto Emma I ricordava bene, e male tutto quanto Emma I ricordava male.

Ha così inizio un curioso *ménage à trois* fra Gilberto, Emma I e Emma II, una convivenza inizialmente felice, soprattutto per l'entusiasta Gilberto.

Ma con il passare del tempo le due Emme incominciano lentamente a differenziarsi, le loro opinioni a divergere, con il povero Gilberto in mezzo, sempre più stretto nella morsa della sua improvvida iniziativa. La loro vita si complica, diventa piano piano un inferno e Gilberto non sa più come uscirne.

Ma una soluzione al problema c'è, ed è la più ovvia. Una sera Gilberto entra nel Mimete e duplica se stesso, creando Gilberto II che farà coppia fissa con Emma II, riportando così in equilibrio la delicata situazione.

Una rivoluzione annunciata

Ma torniamo alle nanotecnologie. Che cosa sono realmente? Di che cosa si occupano e quali sono gli scenari che aprono o apriranno in un prossimo futuro? Dobbiamo aspettarne con impazienza i benefici o temerne con ansia le conseguenze?

Se chiedeste a diversi scienziati e ricercatori che cos'è la nanotecnologia, probabilmente avreste risposte diverse a seconda dell'interlocutore. E questo perché le nanotecnologie coprono tantissimi aspetti, molti dei quali sono profondamente differenti uno dall'altro.

In senso lato la nanotecnologia è l'arte di manipolare la materia su scala atomica. È una disciplina che prende a prestito liberamente concetti e nozioni dalla chimica, dalla fisica e dalla biologia. Tutti sono d'accordo sul fatto che sia una tecnologia ai suoi primi passi, e che potenzialmente abbia le carte in regola per produrre profondi cambiamenti nel futuro. Su tutto il resto non c'è grande accordo: che cosa renderà possibile, quando le potenzialità saranno realizzate e addirittura se almeno alcune delle promesse diverranno mai realtà.

In mezzo a questa apparente confusione, non stupisce che molti riservino il termine nanotecnologia per definire tutto quello su cui operano, in contrapposizione a ciò che fanno gli altri. Pertanto restano aperte domande come: i polimeri sono nanotecnologia? E le tecniche genetiche? O, ampliando ancora il quadro, la chimica non è già per definizione la scienza della trasformazione di molecole in altre molecole? Dove sta la differenza?

Per orientarsi è bene mettere qualche punto fermo. Innanzitutto la nanotecnologia è una tecnologia, ossia l'applicazione pratica di conoscenze di base. Non basta operare con atomi o molecole, o comunque con oggetti di dimensione nanometrica (un nanometro è un milionesimo di metro, ed è di poco superiore alle dimensioni atomiche); occorre poterli manipolare e collocare dove si vuole.

Perciò una qualsiasi branca delle tecnologie esistenti, per potersi definire nanotecnologia, deve avere a che fare con materiali o sistemi dotati di alcuni requisiti particolari: almeno una delle dimensioni spaziali deve essere compresa tra 1 e 100 nanometri e i materiali devono essere prodotti non tramite processi casuali, ma con un controllo completo sulle strutture su scala molecolare che si ottengono.

Quando queste condizioni sono soddisfatte ci si trova in un mondo al confine tra il regno degli atomi e delle molecole, in cui vigono le regole della meccanica quantistica, e il mondo macroscopico che ben conosciamo, dove le proprietà di insiemi di miliardi di miliardi di atomi sono descritte dalle leggi classiche della meccanica.

La musica può fornire un esempio di come le proprietà di un oggetto possano cambiare quando si riducono le sue dimensioni.

La nota prodotta da una corda di chitarra dipende dalla frequenza della sua vibrazione, che a sua volta cambia con la lunghezza della parte di corda che vibra. Il do per esempio corrisponde a una frequenza di 260 hertz.

Se la dimensione della chitarra viene ridotta un milione di volte a livello micrometrico, come è stato fatto usando tecniche litografiche su silicio e ottenendo la chitarrina in miniatura della figura 1, grande quanto una cellula, le oscillazioni delle corde non sono più stimulate meccanicamente ma elettricamente, e si ottengono frequenze dell'ordine dei miliardi di hertz o gigahertz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ hertz}$).

Se poi dalle dimensioni micrometriche passiamo a quelle nanometriche, arriviamo alle vibrazioni molecolari, che sono dell'ordine di 10-100 terahertz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ hertz}$). Frequenze così elevate non hanno alcun interesse dal punto di vista musicale, ma possono essere utili in altri campi.

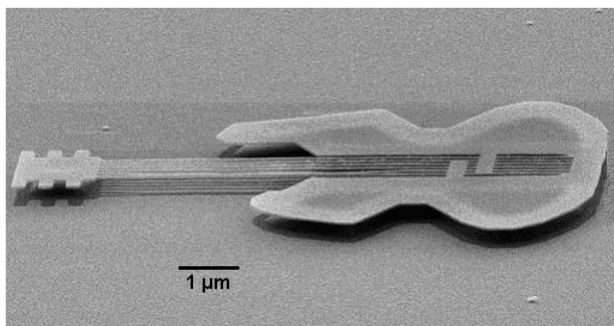


Figura 1. La più piccola chitarra al mondo è lunga 10 micrometri, la dimensione tipica di una cellula; ciascuna delle sei corde è spessa 50 nanometri (circa 100 atomi). È stata prodotta da silicio cristallino per dimostrare la fattibilità di dispositivi elettromeccanici micrometrici. Immagine al microscopio elettronico, per gentile concessione di D. Carr e H. Craighead, Cornell University.

«C'è un sacco di posto là sotto»

Alcune discipline moderne, come le biotecnologie o la scienza dei materiali, hanno origini antichissime: le si può far risalire addirittura ai primi processi di lievitazione del pane o alla scoperta delle leghe metalliche come il bronzo.

La data di nascita delle nanotecnologie invece è ben definita e piuttosto recente: il 29 dicembre 1959. In quel giorno di cinquant'anni fa, infatti, al meeting annuale del Caltech (California Institute of Technology) Richard Feynman, il geniale fisico statunitense, tenne una conferenza dal titolo *There's plenty of room at the bottom*.

In quella celebre lezione Feynman descrisse per la prima volta le potenzialità legate alla manipolazione controllata del mondo atomico:

Quello di cui voglio parlare è il problema di manipolare e controllare le cose su una scala piccolissima. Appena ne parlo, la gente mi ricorda la miniaturizzazione e come questa sia progredita fino a oggi, [...] ma questo è nulla: è soltanto il più primitivo stadio iniziale nella direzione che intendo discutere. [...] Considerate la possibilità che anche noi, come la biologia molecolare, siamo in grado di costruire oggetti piccolissimi che facciano quello che vogliamo; allora potremo anche produrre macchine capaci di manovrare a quel livello. [...] Non ho paura di dire che la questione decisiva sarà se alla fine – in un futuro lontano – saremo capaci di disporre gli atomi nel modo che vogliamo; sì, proprio giù sino agli atomi.

Tra l'incredulità dei presenti Feynman sostenne che un giorno sarebbe stato possibile scrivere l'intera

Enciclopedia Britannica sulla capocchia di uno spillo, e che tutti i libri del mondo avrebbero potuto essere condensati in un minuscolo opuscolo. E questa straordinaria miniaturizzazione sarebbe stata «una semplice riproduzione degli oggetti originali, riportando tutto in scala più piccola, senza perdita di risoluzione».

Nella conferenza Feynman indicò una serie di strade che soltanto in seguito sarebbero state definite nanotecnologia: per esempio produrre computer molto più piccoli e veloci (all'epoca una vera e propria profezia) oppure microchirurgi meccanici da mettere in circolo nel corpo umano per riparare tessuti o rimuovere occlusioni.

Feynman ammise di non avere idea di come si potessero creare macchine di tali dimensioni, ma per stimolare risposte offrì due premi di 1000 dollari: uno per la prima persona in grado di realizzare un motore elettrico funzionante che non fosse più grande di 1/64 di pollice (circa 4 millimetri) per lato, e un altro per la prima persona capace di ridurre una pagina di testo a 1/25 000 delle sue dimensioni (la riduzione necessaria per stipare l'*Enciclopedia Britannica* sulla capocchia di uno spillo).

Il premio per il motore andò poi a un ingegnere che nel 1960 riuscì a costruirne uno molto piccolo, ma usando tecniche meccaniche convenzionali. Sfortunatamente i vincoli posti da Feynman non erano abbastanza forti da richiedere per il micromotore lo sviluppo di una tecnologia del tutto innovativa, però il premio fu pagato lo stesso.

Per il secondo premio si è dovuto attendere oltre un quarto di secolo. Nel 1985 uno studente di Stanford, Thomas Newman, con una tecnica di litografia da fascio di elettroni riuscì a riprodurre la prima pagina di un racconto di Charles Dickens in un'area di soli 6 millesimi di millimetro per lato, venti volte più piccola di ciò che può distinguere l'occhio umano. Questa volta Feynman pagò il premio con entusiasmo, perché era stato fatto un significativo passo avanti tecnologico nella direzione desiderata.

L'attribuzione a Feynman della primogenitura sull'intuizione del ruolo futuro delle nanotecnologie è in larga misura convenzionale. Raramente il credito per la formulazione dei fondamenti di una nuova disciplina può andare a un singolo individuo; di solito il progresso è il risultato di molti sforzi collettivi. Parecchi chimici e fisici hanno contribuito con le loro idee già prima di Feynman alla nascita di questo campo, per esempio Irving Langmuir, grande chimico statunitense della prima metà del Novecento, che riuscì a realizzare i primi esempi di autoassemblaggio spontaneo di molecole; questo, come vedremo, è un aspetto cruciale delle moderne nanotecnologie.

Feynman si limitò a un'osservazione semplice ma essenziale: non ci sono ragioni fisiche fondamentali che impediscano all'uomo di far fare determinate cose ad atomi, molecole o loro aggregati ordinati. Se e quando ci si riuscirà, la potenzialità di questa tecnologia risulterà enorme, come enorme è il numero degli oggetti microscopici coinvolti in processi di quel genere.

Feynman non ha mai parlato di nanotecnologie o di nanoscienza. Il termine nanotecnologia è stato coniato soltanto nel 1974, pare, da Norio Taniguchi dell'Università di Tokyo.

Taniguchi propose di distinguere l'ingegneria su scala micrometrica, o microtecnologia, da un nuovo livello sub-micrometrico che chiamò nano-tecnologia. Ma poi per un decennio l'esistenza di questo nuovo campo rimase sconosciuta ai più.

Nel 1986 però un ricercatore del Massachusetts Institute of Technology, Eric Drexler, scrisse un libro intitolato *Engines of Creation* e destinato a diventare la pietra miliare da cui si è partiti per il rapido e turbolento sviluppo delle nanotecnologie.

Su questo libro e sugli scenari fantascientifici che prospetta, mescolando tecnologie e conoscenze reali con pseudoscienza e futurologia, ritorneremo più avanti. Per ora ci limitiamo a notare un'interessante coincidenza: proprio mentre il visionario Drexler fantasticava sulle future applicazioni delle nanotecnologie, alcune importanti scoperte contribuivano a dare un impulso determinante alla nascita del campo.

Di queste scoperte, del ruolo che hanno avuto e dei personaggi che ne sono stati protagonisti ci occuperemo nei prossimi capitoli.