

Gianfranco Pacchioni

MATERIALI FANTASTICI E COME CREARLI

Dal grafene al computer quantistico,
le nanotecnologie
che ci cambiano la vita

a cura
di Stefano Dalla Casa

ZANICHELLI

INDICE

Introduzione	5
I. Visionari in azione	II
Le nanotecnologie furono immaginate ancora prima di avere a disposizione gli strumenti per realizzarle. Ecco chi sono stati i pionieri.	
2. Quanto grande è «grande» e quanto piccolo è «piccolo»	25
Per capire le nanotecnologie dobbiamo capire che cosa significa veramente l'aggettivo «piccolo», per noi che siamo abituati a valutare e misurare tutto con il metro delle esperienze umane.	
3. Architetture di carbonio	47
La scoperta del fullerene negli anni Ottanta del Novecento ha aperto la strada a quella di altre forme di carbonio che mai avremmo immaginato, come i nanotubi e il grafene.	
4. Vedere per credere	69
Nuove microscopie, basate sulle regole della meccanica quantistica, ci permettono di generare immagini del mondo atomico, ma anche di interagire con esso. Oggi possiamo scrivere usando gli atomi come se fossero inchiostro.	

5.	Dal transistor al computer quantistico	95
	Mentre stiamo raggiungendo i limiti della miniaturizzazione dei circuiti elettronici, il computer quantistico è già una realtà con cui dovremo fare i conti.	
6.	Particelle impalpabili	125
	Senza saperlo, usiamo da secoli le nanoparticelle. Adesso che sappiamo cosa sono e come produrle le possibilità sono infinite.	
7.	Piccolo è bello: il mondo delle nanostrutture	143
	Le dita superadesive del gecko ci insegnano gli strabilianti risultati che si ottengono mettendo assieme un gran numero di oggetti di dimensioni piccolissime, ciascuno con una sua funzione specifica e identica alle altre.	
8.	Nano e bio: due mondi si incontrano	173
	Non arriveremo a rimpicciolire un sottomarino e il suo equipaggio per iniettarlo dentro il corpo umano, ma la possibilità di utilizzare microscopici siluri teleguidati per curare le malattie è meno fantascientifica di quanto si pensi.	
9.	Luci e ombre: i rischi delle nanotecnologie	191
	Ogni tecnologia porta rischi e benefici per la società; in parte li conosciamo e in parte no. Le nanotecnologie non fanno eccezione, ed è importante discuterne.	
10.	Nanomacchine e nanorobot	207
	I virus sono raffinate macchine molecolari naturali, ma nel nostro piccolo siamo già capaci di costruire semplici nanomacchine. Ma saremo mai in grado di fare dei nanorobot?	
	Le fonti di questo libro	231
	8 miti da sfatare	239
	Forse non sapevi che...	245
	Indice analitico	251

CAPITOLO DECIMO

Nanomacchine e nanorobot

Questo pezzo è il primo che è stato montato dalle mie formiche: dalle rufe dei pini, le più robuste ed abili. Ho insegnato in estate a una squadra di dieci, e loro hanno fatto scuola a tutte le altre. Dovrebbe vederle, è uno spettacolo unico: due afferrano i due elettrodi con le mandibole, una li attorciglia di tre giri e li fissa con una gocciolina di resina, poi tutte e tre depongono il pezzo sul trasportatore. In tre, montano un resistore in 14 secondi, compresi i tempi morti, e lavorano 20 ore su 24. [...]

Ma questo è solo un inizio: sto allenando altre squadre per altri lavori «impossibili». Una a tracciare il reticolo di diffrazione di uno spettrometro, mille righe in 8 millimetri; una a riparare circuiti stampati miniaturizzati, che finora una volta guasti si buttavano via; una a ritoccare negative fotografiche; quattro a svolgere lavori ausiliari nella chirurgia del cervello, e già sin d'ora le posso dire che si dimostrano insostituibili nell'arrestare le emorragie dei capillari.

Primo Levi, «Primo impiego», in *Storie naturali*

Nel 2005 la rivista *Forbes* faceva un elenco in ordine di importanza dei prodotti *nanotech* immessi sul mercato quell'anno: al primo posto c'era un iPod nano delle dimensioni di una matita (oggi gli iPod sono addirittura scomparsi, e le loro funzioni inglobate in quelle degli smartphone); al secondo posto c'era un olio nutriente per ridurre il colesterolo, basato su capsule di 30 nm per veicolare il principio

attivo; al terzo posto una gomma da masticare al sapore di cioccolato, ottenuta grazie a nanocristalli per rendere compatibile il burro di cacao con i polimeri della gomma; al quarto una crema cosmetica da giorno basata su fullereni. Be', se la rivoluzione nanotecnologica fosse tutta qui, forse si sarebbe un po' esagerato nel *battage*. In realtà la stessa rivista *Forbes* in un articolo del 2022 affrontava la questione dell'impatto delle nanotecnologie sul nostro futuro individuando tre aree principali. Una è la scienza dei materiali, dove l'uso di nanoparticelle combinato alla stampa 3D apre grandi prospettive anche industriali. Un'altra area importante è la nanomedicina, per via degli sviluppi di tecnologie di sequenziamento genetico, trasporto di farmaci, e diagnostica avanzata. E poi c'è la nanoelettronica, perché i nanosensori, i sistemi per generazione e stoccaggio di energia, l'immagazzinamento di dati e molto altro ancora avranno un grande impatto.

Come si può vedere nel giro di meno di venti anni si è passati da qualche applicazione specifica e non sempre di forte utilità, a vaste applicazioni con altissimo valore aggiunto, e che sono di fondamentale importanza per alcune problematiche di cui si parla molto: salute, energia, *data science*.

Se a questo si aggiunge che il processo *top-down*, anche noto come *nanotecnologie I.O.*, ha portato a una miniaturizzazione spinta all'estremo dei dispositivi e processi elettronici, regalandoci rivoluzioni epocali come Internet, smartphone, intelligenza artificiale, non dovrebbero restare molti dubbi sulla potenzialità delle nanotecnologie.

Ho già accennato al fatto che oggi si guarda con interesse alle *nanotecnologie 2.0*, che prevedono di seguire il percorso inverso, dal piccolo al grande (si fa per dire) o meglio ancora *bottom-up*, dal basso verso l'alto. Dato che questo è in qualche modo il processo seguito dalla natura con la comparsa della vita sulla Terra, la capacità di costruire nanomacchine o dispositivi nanometrici partendo da semplici molecole aprirebbe prospettive totalmente nuove e rivoluzionarie. Questo è proprio quello a cui fece riferimento nel lontano 1986 il celebre visionario delle nanotecnologie Eric Drexler.

Macchine della creazione

Parte dell'interesse e della curiosità per le nanotecnologie ruota attorno a un concetto e a una prospettiva che sono al tempo stesso affascinanti e facili da comprendere per la gran parte delle persone: la possibilità di creare *nanomacchine* e persino *nanorobot*.

A parlare di questa eventualità fu appunto Drexler nel già citato libro *Engines of Creation* (Motori della creazione). L'immaginazione di Drexler era stata colpita dalla capacità di riprodursi tipica di alcuni batteri. L'*Escherichia coli*, per esempio, se fornito di un continuo supporto di sostanze nutrienti, può raddoppiare la propria popolazione ogni 20 minuti circa. In teoria perciò l'*E. coli* potrebbe ricoprire l'intero pianeta con uno strato di batteri nel giro di pochi giorni.

Secondo Drexler, seguendo e realizzando le intuizioni di Feynman, gli esseri umani potranno in futuro produrre in piccolo quello che oggi sono capaci di fare «in grande»: una miniaturizzazione spinta all'estremo, al livello atomico, di metodi e concetti che oggi governano gli automatismi meccanici, quella che spesso va sotto il nome di *robotica*.

Questi dispositivi potrebbero fare su scala atomica ciò che i loro consimili fanno nel mondo che conosciamo: avendone a disposizione quantità immense, si può pensare di inventare nuove vie per produrre e generare sostanze, materiali e anche oggetti complessi. Con grandi ricadute in tutti i campi, a partire dalla medicina: immaginate nanomacchine capaci di viaggiare nel corpo umano orientandosi come fa un'automobile in città, di individuare il tessuto malato, di produrre le cellule mancanti riparando così il danno, senza interventi chirurgici e senza protesi.

A chi solleva obiezioni a questa visione tanto accattivante, Drexler ha sempre risposto che i progressi nella medicina ci hanno già sorpresi molte volte. In passato l'idea di poter operare un paziente sveglio, che non sente dolore grazie a un'anestesia locale, appariva semplicemente assurda. Un chirurgo francese, Alfred Velpeau, scriveva nel 1839:

Eliminare il dolore in chirurgia è una chimera. Bisturi e dolore sono due parole di cui il paziente dovrà sempre essere consapevole. È un connubio a cui dobbiamo abituarci.

Ma anche debellare malattie che hanno spopolato interi continenti, come la peste o la poliomielite, semplicemente con l'uso di antibiotici o vaccini in passato sarebbe apparso miracoloso. E che dire della capacità di sostituire il cuore o il fegato in un corpo umano, prelevandolo da un altro? Dunque, conclude Drexler, ciò che oggi appare impossibile può diventare praticabile tra qualche tempo.

Ma l'idea lanciata da Drexler che ha colpito ancor più l'immaginazione popolare è che sia possibile generare un secondo tipo di nanomacchina: l'*assemblatore*, un costruttore universale in grado di realizzare e duplicare qualsiasi struttura, compreso sé stesso. Insomma, il Mimete di Primo Levi, che abbiamo ricordato all'inizio di questo libro. Però un Mimete su scala nanometrica, capace di operare atomo per atomo con una serie di nanopinzette, prelevando i singoli mattoncini atomici e disponendoli nel modo desiderato.

In uno dei passaggi chiave del suo libro, Drexler racconta come un sistema di produzione molecolare di questo tipo potrebbe essere usato per costruire il motore di un razzo. Assemblatori replicanti sarebbero in grado di racchiudere in sé stessi le informazioni necessarie, e avendo sufficiente materia prima da cui prelevare i pezzi, ossia gli atomi, il motore potrebbe essere pronto in un giorno. Se questo fosse possibile per un razzo allora sarebbe possibile per qualsiasi oggetto, da un frigorifero a un telefono cellulare. Potremmo insomma avviarci verso vere e proprie nanofabbriche in cui al posto degli operai ci siano miliardi di miliardi di picco-

lissimi oggetti, ognuno con una funzione specifica, tutti volti al raggiungimento dello stesso obiettivo. Potremmo quindi trovarci di fronte a qualcosa di molto simile a quell'evento per ora unico e straordinario che ha portato alla nascita della vita sulla Terra. Per dirla con le parole di Bill Bryson nel suo bellissimo libro *Breve storia di (quasi) tutto*:

A un certo punto, in un passato inconcepibilmente remoto, una microscopica sacca contenente sostanze chimiche sussultò inquieta e varcò la soglia della vita. Assorbì un po' di nutrimento, pulsò flebilmente e godette una breve esistenza. Tutto questo probabilmente era già successo prima, forse molte altre volte. Ma questa piccola sacca ancestrale fece qualcos'altro, qualcosa di straordinario: si divise e generò una prole. Una minuscola quantità di materiale genetico passò così da un'entità vivente a un'altra, e da allora questa trasformazione non si è più fermata. Fu quello, per tutti noi, il momento della creazione.

Inutile dire che questo scenario ha subito attratto l'attenzione dei media. E degli scrittori di fantascienza. Se l'assemblatore è in grado di replicare anche sé stesso, infatti, come essere sicuri che non sfugga al nostro controllo? Da una rivoluzione positiva si potrebbe rapidamente passare a un disastro senza precedenti. È lo sfondo ideale per un romanzo di fantascienza, e infatti non c'è voluto molto perché Michael Crichton nel 2002 si buttasse nell'agone con il suo romanzo *Preda*. Una storia di batteri che producono sostanze chimiche che sono poi modificate e combinate a generare assemblatori, dai quali nasce un minuscolo robot

volante con un computer di bordo, una cella solare e altri aggeggi del genere. Ma per qualche ragione sconosciuta le persone infettate dai nanorobot si sciolgono in pochi secondi. Naturalmente qualcuno si opporrà a questa catastrofe imminente e salverà l'umanità dal suo destino crudele. È chiaro che storie di questo tipo non possono che suscitare curiosità, interrogativi e qualche paura più o meno fondata.

Che cosa sono dunque le nanomacchine e gli assemblatori? Riusciremo mai a produrli veramente? E se sì, quando? In queste domande, e nelle risposte, è racchiuso il significato e il potenziale più profondo delle nanotecnologie: la possibilità non soltanto di generare oggetti utili grazie alle loro piccole dimensioni, ma oggetti in grado di produrne altri, e quindi di sostituirsi completamente ai metodi di produzione tradizionali. Come la macchina a vapore è stata il punto di partenza della Rivoluzione industriale, così le nanomacchine potrebbero rappresentare una nuova fase nella storia dell'umanità.

Nanomacchine in natura

Iniziamo da una questione più semplice, cercando di definire che cosa si intende per nanomacchina. Semplificando possiamo dire che è un dispositivo che esegue un lavoro. Il che implica subito un vincolo importante: per funzionare ha bisogno di energia. Inoltre per poter fare qualcosa di utile, per

poter eseguire un progetto, deve contenere in sé l'informazione necessaria.

Dunque tre condizioni sono essenziali affinché si possa parlare di nanomacchina: svolgere un lavoro, avere a disposizione una fonte di energia (oltre che di materia prima da manipolare) e sapere cosa fare. Tutto questo non è affatto banale, e non ci sono ancora idee precise su come si possano condensare le tre caratteristiche in un oggetto su scala nanometrica.

In realtà in natura esistono già oggetti che corrispondono alla nostra descrizione. Le *cellule*, che hanno dimensioni micrometriche, contengono infatti organelli e aggregati molecolari il cui funzionamento soddisfa perfettamente i requisiti richiesti dalla definizione di nanomacchina.

Ma c'è di più: le cellule sono intrinsecamente strutture autoreplicanti, che catturano molecole dall'ambiente circostante e poi ne usano alcune per produrre l'energia necessaria al proprio funzionamento, altre per sintetizzare le parti necessarie per conservarsi, muoversi, difendersi e replicarsi. E l'informazione per la replicazione è presente e codificata nelle molecole di DNA, che la trasmettono da una generazione alla successiva.

Uno speciale tipo di molecola, l'RNA messaggero, serve come trascrizione temporanea di questa informazione e – come abbiamo già visto – la porta ai ribosomi dove avviene la sintesi delle proteine, che genera il materiale di base per la vita.

La strategia che la cellula adotta per sintetizzare le proprie parti e replicarsi è articolata in due stadi.

Il primo è la formazione di nuovi legami chimici tra le singole molecole che andranno a costituire le proteine (in termine tecnico si tratta di una *polimerizzazione*). Nel secondo stadio le catene molecolari così generate si avvolgono su sé stesse a formare oggetti tridimensionali. Il tutto avviene spontaneamente e a bassa temperatura, com'è quella del nostro organismo. È un po' come infilare le perline (gli aminoacidi) per creare una collana (un polipeptide) che poi si autoassembla in una macchina (la proteina): un processo che calza perfettamente con quanto previsto da Drexler.

Un altro esempio di nanomacchina in biologia è il *cloroplasto*. Presente nelle cellule vegetali e nelle alghe, è una struttura che contiene schiere di molecole che agiscono come antenne per catturare l'energia luminosa e convertirla in combustibile chimico che poi serve al funzionamento della cellula. Il cloroplasto agisce dunque come una cella solare in miniatura, anche se sfruttando fenomeni del tutto diversi.

Il mitocondrio invece è una centrale di potenza che genera l'energia per il sistema cellulare utilizzando materiali provenienti dalla combustione controllata di molecole organiche come il glucosio. L'energia liberata non è convertita in energia elettrica che corre lungo fili di rame, come nelle nostre case, ma viene usata dal mitocondrio per «caricare» molecole di adenosinatrifosfato, ATP, che circolano nella cellula come minuscole batterie chimiche e danno un contributo essenziale a molte reazioni biologiche.

Anche il *motore flagellare* dei batteri ha sorprendenti somiglianze con le nanomacchine. La sua funzione molto specializzata ricorda quella di un motore macroscopico, con azione meccanica. È un aggregato altamente strutturato di proteine legate alla membrana delle cellule batteriche e serve a fornire il moto rotatorio al *flagello*, la lunga struttura a frusta che spinge i batteri consentendo loro di spostarsi nei liquidi. Come ogni motore, anche il motore flagellare ha un albero e una struttura che lo circonda come un'armatura; al posto dell'energia elettrica o della benzina, per funzionare usa molecole di ATP.

«Replicare» la natura

Scopriamo dunque che le macchine molecolari già esistono, funzionano bene, sono complesse e altamente affidabili. Sono il risultato di un processo evolutivo durato miliardi di anni e fanno cose mirabili che noi non sappiamo ancora riprodurre. Se riuscissimo anche soltanto a imitare questi processi, pur con minore efficienza, avremmo già fatto un passo in avanti incredibile.

Siamo dunque in grado di costruire nanomacchine, o quantomeno lo saremo in un prossimo futuro?

La prima questione da affrontare è: da dove dovrebbe venire l'energia per far funzionare le nanomacchine? Gli organismi cellulari hanno sviluppato un metodo complesso ed efficace per produrre energia sfruttando reazioni chimiche o fotochimiche.

che, usando la luce solare. Certo, possiamo immaginare di imparare un giorno a fare lo stesso, ma il modo è ancora tutto da inventare.

C'è poi l'altro problema, altrettanto importante: dove racchiudere l'informazione? Senza un progetto, senza un manuale, la capacità potenziale di «assemblare» qualcosa non serve a niente. Bisogna avere un foglio di istruzioni da seguire, come quando acquistiamo mobili componibili da montare a casa.

La biologia dimostra come sia possibile codificare informazione e rileggerla nelle pieghe del DNA. È possibile che in futuro si riesca a riprodurre questo modo di trasportare informazione, ma anche qui non c'è nessuna garanzia. Forse si possono inventare altri metodi, magari basati sul codice binario, ma ancora una volta siamo fermi al campo delle ipotesi, o al massimo ad alcuni primi rudimentali elementi.

Fino a quando non si sapranno mettere fonti di energia e vettori di informazione a servizio delle nanomacchine, c'è ben poco che si possa fare con esse. Questi però sono limiti posti soltanto dalla nostra incapacità di riprodurre la natura. È probabile che tra qualche decennio, guardando indietro, ci si stupirà di quanto primitive fossero le nostre conoscenze e abilità odierne, esattamente come noi sorridiamo quando pensiamo a un impianto telegrafico di fine Ottocento o al cavadenti-barbieri di epoche passate.

Ma c'è anche un altro limite, di tipo fondamentale e quindi più serio: è legato alla capacità intrinseca delle «nanopinzette» dei minuscoli robot

di prendere e spostare gli atomi. Chi ha maggiormente insistito su questo problema e su come potrebbe essere impossibile aggirarlo è il compianto Richard Smalley, lo scopritore del fullerene.

C'è chi ha osservato che l'assemblatore di Drexler semplicemente ignora molte delle difficoltà concettuali legate alla fabbricazione delle nanomacchine e dell'autoreplicazione. E ciò per due ragioni principali. La prima è che le pinzette necessarie per prendere e manipolare gli atomi rischiano di creare problemi di spazio. Una pinzetta nanometrica, costretta a muoversi in mezzo a un insieme di atomi assai più piccoli, sarebbe un po' come un elefante in una cristalleria. Come fece notare Richard Smalley adattando la celebre frase di Feynman, in realtà di spazio per queste operazioni non ce n'è poi così tanto, là in fondo.

C'è poi un secondo problema, forse ancora più serio del primo e ben noto ai chimici. Raramente gli atomi stanno nel loro stato di atomi isolati. Essi tendono a reagire, talvolta in modo estremamente rapido, e a formare legami saldi con altri atomi o molecole. Gli atomi di carbonio, per esempio, in natura non si trovano mai soli, sono sempre combinati con altri atomi. Per prelevare i mattoncini con cui costruire le nanomacchine è dunque necessario per prima cosa liberarli dai loro legami e separarli dal resto degli atomi a cui sono attaccati. Un'impresa tutt'altro che semplice.

Rompere un legame chimico costa molta energia, il che crea problemi per l'alimentazione della macchina. Quando poi un atomo è ricollocato

altrove, a formare un'altra struttura, si formano nuovi legami: l'energia ora viene liberata, ponendo severi problemi di raffreddamento della macchina stessa (fino a metterne in forse la sopravvivenza).

Anche il processo di «staccare» e «riattaccare» un atomo è semplice soltanto quando le forze in gioco sono deboli. Con la punta di un microscopio STM si è riusciti in effetti a spostare singoli atomi e a ricollarli altrove. Ma se l'atomo in questione è fortemente reattivo, come l'ossigeno o il carbonio, esso tenderà a legarsi stabilmente alle nanopinze e separarli diventerà assai problematico.

C'è infine il problema del movimento delle nanomacchine. Immaginiamo che viaggino in un ambiente acquoso. Se l'oggetto è molto più grande delle singole molecole di H_2O , gli urti di queste ultime saranno del tutto trascurabili. Ma se una nanomacchina è sufficientemente piccola, diciamo 50 nanometri, allora diventa molto difficile governarne gli spostamenti, che seguiranno le leggi del *moto browniano* con una traiettoria casuale senza alcuna direzione definita. Anche le cellule nel sangue, pur essendo da 10 a 100 volte più grandi di un ipotetico «nanosommersibile», non si spostano con moto proprio ma sono trasportate dal flusso.

È chiaro, dunque, che esistono problemi e dubbi molto seri sulla possibilità di realizzare i nanodispositivi di cui si parla. E non si tratta soltanto di problemi tecnologici complessi ma risolvibili in linea di principio: in molti casi entrano in ballo limiti fisici fondamentali, e come tali non aggirabili se non con approcci concettuali totalmente diversi.

In effetti i nanoassemblatori di Drexler sono troppo simili ai robot macroscopici per poter funzionare nel nanomondo. Gli esempi che ci vengono dal mondo biologico mostrano chiaramente come le vie da seguire siano del tutto differenti, e proprio per questo molto difficili – ma non impossibili – da immaginare.

Supermolecole

L'idea di cui stiamo per parlare parte da lontano. Già nel 1894, infatti, il chimico e premio Nobel Emil Fischer aveva formulato i principi fondanti di quella che oggi è chiamata *chimica supramolecolare*. Fischer intuì che alcune interazioni che avvengono in natura, come quelle tra un enzima e un substrato biologico, seguono principi simili a quelli con cui funzionano una chiave e la serratura, ossia con un riconoscimento a livello molecolare della forma dei due sistemi. Si tratta di un riconoscimento basato sulle deboli forze di Van der Waals, che abbiamo già incontrato parlando del gecko e che sono importantissime nel mondo biologico: determinano, tra l'altro, la struttura delle proteine e la forma a doppia elica del DNA. Negli anni seguenti i chimici svilupparono processi di sintesi volti a mettere a punto strutture molecolari complesse, vere e proprie architetture fatte di molecole. L'importanza della chimica supramolecolare fu pienamente riconosciuta nel 1987 quando il premio Nobel per la Chimica fu assegnato a tre pionieri del setto-

re, Donald J. Cram, Jean-Marie Lehn e Charles J. Pedersen. Il titolo (tradotto in italiano) della conferenza di Lehn alla consegna del premio illustra bene l'argomento: «Chimica supramolecolare: scopi e prospettive. Molecole, supermolecole e dispositivi molecolari». Va notato che nel 1987 praticamente nessuno parlava ancora di nanotecnologie; l'eco del libro di Drexler non si era ancora diffusa al di qua dell'Atlantico. Sul finire del Novecento, gli studi in questo campo divennero via via più sofisticati, e volti a costruire dispositivi a livello nanometrico come fili di materiale organico capaci di condurre l'elettricità, interruttori molecolari in grado di consentire o proibire il passaggio di corrente, o ancora semplici nanomacchine che potessero eseguire azioni meccaniche elementari.

Tra le macchine molecolari oggi prodotte dai ricercatori ci sono rotori, giroscopi, pompe, freni, ingranaggi, serrature e persino arpioni. Alcune di esse funzionano sfruttando l'energia luminosa, che induce nelle molecole transizioni elettroniche sfruttabili per «spostare» un pezzo di struttura da una parte a un'altra. Altre volte il movimento è stimolato da impulsi elettrici o chimici.

Per comprendere cosa sono le macchine molecolari e le loro potenzialità, possiamo fare un esempio. Tutti conoscono il Lego, il celebre gioco di costruzioni con i mattoncini colorati introdotto nel lontano 1958. Da piccolo fu il mio passatempo principale, e ci costruivo case, castelli, ponti. Non era possibile, però, fare cose più complesse, perché allora non c'erano pezzi come ruote, pulegge,

snodi, necessari per costruire anche oggetti mobili, dinamici. Ma col passare degli anni vennero introdotti nuovi elementi, e oggi con il Lego è possibile costruire di tutto: scavatrici, gru, pupazzi, astronavi, robot e quant'altro. Insomma, si possono assemblare delle vere e proprie macchine che, se alimentate da un motore con una batteria, hanno «vita» propria, svolgono un lavoro. Bene, nel nanomondo molecolare al posto dei Lego ci sono le molecole. Solo che i mattoncini sono disponibili in alcune centinaia di fogge e colori, mentre i chimici possono sintetizzare e isolare più di 90 milioni di sostanze chimiche diverse. Come dire, una scatola di «mattoncini» praticamente infinita. C'è poi un'altra differenza sostanziale tra una macchina costruita con il Lego e una macchina molecolare: la prima la dobbiamo montare noi seguendo precise istruzioni o lavorando con la fantasia, una macchina molecolare deve costruirsi da sola, o meglio autoassemblarsi sfruttando quelle importantissime interazioni deboli di cui parlavamo poco fa.

In qualche misura, quello che si cerca di fare con le macchine molecolari create in laboratorio è riprodurre le meravigliose e numerose macchine molecolari che esistono in natura. Abbiamo già fatto vari esempi di macchine molecolari naturali, ma forse nessuno è più convincente del caso delle chinesi, una famiglia di proteine che, nelle nostre cellule, svolge la funzione simile a quella di un cavallo da tiro per trasporto merci. Su Internet si trovano interessanti filmati che valgono meglio di qualsiasi descrizione. Con una estremità, potrem-

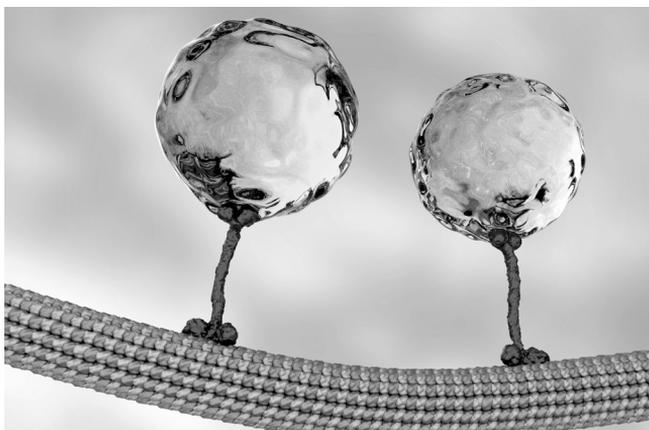


Figura 17. Illustrazione che mostra due chinesine che «camminano» su un microtubulo (il cilindro orizzontale) trasportando un carico (le sfere). Immagine: Dr_Microbe/iStock.

mo dire con i piedi, le chinesine si legano ai microtubuli presenti nella cellula, della sorta di monorotaie su cui «camminano» letteralmente passo dopo passo trasportando un carico, per esempio una molecola o un organello, legato all'altra estremità (figura 17).

Nonostante il carico possa essere decine o anche centinaia di volte più grande, le chinesine si muovono agevolmente, alla velocità di 50-100 nm al secondo. Insomma, sono i magazzinieri della cellula, addetti allo smistamento dei pacchi. Ma questo è solo un esempio. Perché là sotto, nel mondo a noi invisibile delle cellule e dei microrganismi c'è un grande ribollire di attività frenetica.

Riuscire a creare nuove ed efficienti macchine molecolari aprirebbe prospettive incredibili, come previsto da Feynman nel 1959 e poi descritto da

Drexler una trentina di anni dopo. Non a caso, i progressi nel campo sono stati tali da portare il comitato Nobel a dedicare il premio per la Chimica del 2016 proprio a questa disciplina, premiando tre protagonisti di primo piano, Jean-Pierre Sauvage, Fraser Stoddart e Bernard L. Feringa. Purtroppo il Nobel non può andare a più di tre scienziati, e rimase escluso il nostro Vincenzo Balzani, chimico bolognese tra i padri fondatori della scienza delle macchine molecolari. Per capire che si è trattato di un mancato riconoscimento basta leggere il comunicato ufficiale dell'Accademia delle Scienze svedese che, nel ripercorrere la storia della scoperta, apre e chiude la lista dei riferimenti proprio con i lavori fondamentali di Balzani e del suo gruppo, richiamati più volte nel testo.

Oggi una delle icone a cui si ricorre più spesso per illustrare le macchine molecolari artificiali, è quella della *nanocar*, sviluppata da Feringa e soci nel 2011. Si tratta di una struttura molecolare formata da un asse a cui sono legate quattro «ruote» grazie a cui la complessa molecola, perché di questo si tratta, si muove. Eccitando elettronicamente la molecola si generano dei cambiamenti nella struttura che provocano una rotazione delle quattro «ruote a pale» (figura 18).

Con dieci impulsi elettrici il nanoveicolo percorre la distanza non proprio impressionante di 6 nm. Dopo quella di Feringa sono state messe a punto altre nanocar, e oggi si svolgono vere e proprie gare, sia pure molto particolari: le minuscole strutture molecolari vengono assemblate su super-

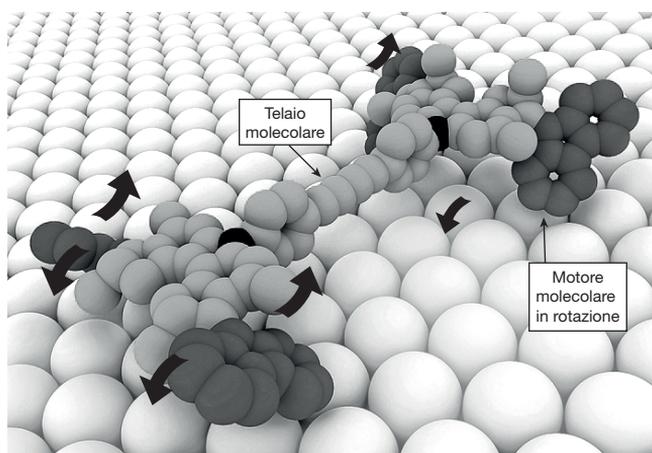


Figura 18. Illustrazione della nanocar sviluppata da Bernard L. Feringa e dal suo gruppo di ricerca. Immagine: adattato da Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.

fici di oro tenute a una temperatura vicina allo zero assoluto, $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Qui devono coprire distanze dell'ordine di $0,0000001$ metri in tempi che vanno dalle ore a un paio di giorni. Insomma, non è propriamente la Formula 1.

La nanocar è oggi l'immagine più efficace di cosa sono le macchine molecolari messe a punto in laboratorio. Però attenzione: pensare di costruire macchine molecolari semplicemente riducendo le dimensioni di quelle che usiamo nel mondo macroscopico non è la via da seguire. È come assumere che altre forme di vita nell'universo, sempre che esistano, debbano necessariamente essere fatte a nostra immagine e somiglianza: avere due braccia, due occhi, due gambe, come l'ingenua iconografia dei film di fantascienza ci ha abituato a credere.

In realtà pensare «nano» vuol dire soprattutto pensare «in grande», andare oltre gli schemi convenzionali e immaginare strade completamente nuove per fare le cose che ci servono.

Le leggi che governano il nanomondo sono diverse da quelle a cui siamo abituati, e non consentono di trasferire la nostra esperienza quotidiana «là in fondo». Dove c'è sì molto spazio, ma soprattutto c'è spazio per ingegnosità e immaginazione. Per questo si parla di nanotecnologie 2.0, perché questo è lo scenario futuribile in cui nano e biotecnologie convergeranno per mettere a punto processi che sempre più si ispirino alla natura per produrre cose che possano andare a beneficio del genere umano.

Macchine molecolari «cattive»

Parlando di macchine molecolari artificiali e naturali, non è possibile chiudere questo capitolo senza accennare ai virus. Abbiamo purtroppo imparato a fare conoscenza con loro per via di pandemie ricorrenti, non ultima quella di COVID-19.

Ma cosa c'entrano i virus con le nanotecnologie? C'entrano eccome, perché i virus non sono altro che complesse macchine molecolari. Sono oggetti di dimensioni tipicamente nano, da qualche decina a qualche centinaio di nanometri, e sono quindi molto più piccoli delle cellule che attaccano. Lo fanno per utilizzare la cellula e il suo apparato per replicarsi, dato che sono parassiti obbligati e non

possono farlo da soli. Per questo i virus non sono considerati esseri viventi, ma organismi al confine tra il mondo vivente e quello inanimato. Non c'è nulla di più naturale dei virus, benché a volte ci sembri più rassicurante l'idea che siano stati creati in laboratorio. I virus sono molti di più di quanto si creda. Solo nelle acque del pianeta ci sono 10^{30} particelle virali. Sono ancora più abbondanti dei batteri. Poiché i virus uccidono le cellule, hanno un impatto sull'ecologia oceanica. Ogni secondo negli oceani si verificano circa cento trilioni di infezioni da virus (10^{23}), che convertono gli organismi viventi in biomassa destinata a decomporsi e divenire anidride carbonica. I virus esistono da quando esiste la vita sul pianeta, ma non sappiamo bene perché. Sappiamo che nei processi evolutivi hanno contribuito a mescolare il patrimonio genetico degli organismi. Di certo oggi rappresentano per noi, come per tutte le altre forme di vita sulla Terra, un elemento di rischio. Attaccano tutto: dalle ostriche ai maiali, dai cetriolini ai rapanelli. Da un certo punto di vista sono macchine molecolari perfette, con un'origine del tutto naturale ma non per questo particolarmente benefica.

Il fine ultimo

Ora che abbiamo intrapreso il cammino verso la costruzione di nuove macchine molecolari mai esistite prima, la capacità di riprodurre o simulare i processi biologici è divenuta più vicina, con tutto

il suo bagaglio di potenzialità, misteri, incognite ma anche di rischi. Come per ogni nuova tecnologia dovremo imparare a svilupparla per il bene del genere umano, e non per creare più problemi di quelli che già ci sono. Ciò significa che sarà molto importante, come per ogni altro settore dello sviluppo tecnologico, esercitare un controllo sociale, etico, civile, sugli sviluppi di queste tecniche e sul loro sfruttamento. Questo non dovrà diventare appannaggio esclusivo di grandi aziende private come, purtroppo, sta succedendo per molti settori chiave del comparto *high-tech*. Nei prossimi anni e decenni assisteremo a progressi strabilianti nel campo dell'integrazione cervello-macchina e della genetica, come nello sviluppo dell'intelligenza artificiale e delle tecnologie quantistiche, tanto per citare alcuni settori da cui ci si attendono risultati eclatanti.

Ma le nanotecnologie del futuro non saranno da meno, anzi. Una volta integrate con altre tecnologie dalle grandi potenzialità potranno portare a cambiamenti profondi e irreversibili non solo dei nostri costumi e stili di vita, ma addirittura nel nostro stesso modo di essere «umani». Questo esula dalla pura e semplice analisi di dove ci stanno portando la scienza e la tecnologia contemporanee: entriamo in quel delicato ma fondamentale tema che è il rapporto tra scienza e società.

Conoscere meglio come funzionano, cosa comportano e cosa promettono le nanotecnologie del futuro prossimo è un passaggio obbligato e fondamentale per garantire che contribuiscano a miglio-

rare la nostra vita, a ridurre i nostri bisogni, a mitigare le disuguaglianze, e non certo ad aumentare i nostri crucci. In ultima analisi, è anche per questo che è stato scritto questo libro.