

Nanotecnologie in medicina e Biologia

NANOSTRUTTURE

Si chiamano nanostrutture le più piccole configurazioni di materiali fabbricabili nel range di dimensioni tra 1-100 nanometri ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Si noti che le strutture su scala nanometrica sono davvero molto piccole: un nanometro è circa la dimensione di 10 atomi di idrogeno messi in fila. L'oggetto più piccolo che i nostri occhi possono risolvere (ad esempio un puntino disegnato a matita), è di circa 100.000 nm. Di seguito sono riportati due esempi di dimensioni su scala nanometrica: in genere le nostre unghie crescono 1 nm in circa 1 s. Inoltre, se il diametro di un blocco di marmo si riducesse di 1 nm, il diametro della Terra sulla stessa scala si ridurrebbe di 1 m (si veda l'Esercizio 1).

Le nanostrutture sono onnipresenti in natura. Le componenti centrali della materia vivente, come le proteine, il DNA, e molte altre strutture delle cellule sono nel range di dimensioni del nm. Le polveri di argilla, sale e quelle di fuliggine sono tipicamente nanoparticelle (NP abbreviato) nel range tra 30-200 nm. Tali particelle sospese nell'aria servono come nuclei nella formazione di goccioline di nubi costituendo l'aerosol. L'effetto quantitativo di questo aerosol sul clima e sulla salute è ben documentato, ma non ancora pienamente compreso, rimanendo oggetto di intensi studi.

NANOTECNOLOGIE

La nanotecnologia consiste nella costruzione, manipolazione e utilizzo di materiali basati su nanoparticelle, di composizione e forma controllata. Le nanoparticelle sono state utilizzate in una vasta gamma di applicazioni ben prima che le loro proprietà fossero pienamente comprese: già nel Medioevo gli artigiani avevano imparato che mescolando cloruro d'oro nel vetro fuso avrebbero potuto ottenere un vetro riccamente colorato. E' ora noto che così facendo stavano producendo all'interno del vetro delle particelle nanometriche d'oro. Nanoparticelle di carbonio nero, sono state utilizzate per decenni come materiale di rinforzo in composti a base di gomma, un'applicazione importante nella fabbricazione di pneumatici.

L'era della nanotecnologia moderna è stata avviata dallo sviluppo negli anni '80 di tecniche di imaging con sonde di scansione microscopiche. Questi strumenti hanno permesso non solo di visualizzare, ma anche di manipolare le nanostrutture. Tali tecniche sono state sviluppate per produrre nanoparticelle di forma e composizione controllata. Ad esempio, è ora possibile fabbricare nanoparticelle con un guscio metallico sottile che circonda un altro materiale con proprietà progettate per applicazioni specifiche.

Il campo della nanotecnologia si è sviluppato in due direzioni principali. Un ramo dello sforzo è incentrato sullo sviluppo di nuovi nanomateriali con proprietà predeterminate, ad esempio per un utilizzo più efficiente dell'energia solare. L'altra area di intensa attività è l'applicazione delle nanostrutture in biologia e medicina. Quest'ultimo è il centro della nostra discussione.

Fino ad oggi nel campo della biologia e della medicina, le nanoparticelle d'oro e d'argento sono state quelle più ampiamente studiate e utilizzate, in particolare l'argento per le sue proprietà antibatteriche. Un fattore chiave per l'utilizzo di nanoparticelle d'oro consiste nella possibilità di legare molecole biologicamente importanti con particelle d'oro. Sebbene nella maggior parte dei casi l'oro sia chimicamente inerte, con una preparazione adeguata esso reagisce con le molecole contenenti zolfo formando un legame relativamente stabile. Attraverso il legame zolfo-oro, una vasta gamma di molecole contenenti zolfo, come il DNA e le proteine, tra cui gli enzimi e gli anticorpi, possono essere legate a nanoparticelle d'oro.

Proprietà delle nanostrutture

Le proprietà delle nanoparticelle sono spesso molto diverse da quelle degli altri materiali, discuteremo brevemente quelle aventi implicazioni nel campo della biologia e della medicina.

Proprietà ottiche delle nanoparticelle di metallo

Nei metalli come l'argento, l'oro e il rame, gli atomi carichi positivamente (ioni) si trovano in posizioni fisse circondati da elettroni delocalizzati. Questi elettroni sono liberi di muoversi all'interno del metallo in risposta ad un campo elettromagnetico, inteso come campo elettrico oppure onda luminosa. L'interazione degli elettroni delocalizzati con la luce può essere descritta come una oscillazione collettiva forzata della nuvola di elettroni alla frequenza della luce (la relazione tra la frequenza della luce f e la sua lunghezza d'onda l è data da: $f = c / l$, dove c è la velocità della luce.) L'oscillazione collettiva degli elettroni implica l'assorbimento e la successiva emissione di luce. La nube di elettroni nell'Argento è facilmente indotta ad oscillare a frequenze corrispondenti all'intero spettro visibile, ovvero la gamma di lunghezze d'onda dal blu (390 nm) al rosso (750 nm). Alle energie ottiche l'efficienza di assorbimento e riemissione di luce è circa uguale. Pertanto, quando l'argento è illuminato con luce bianca, l'intero spettro viene riemesso generando il colore bianco argenteo del metallo. La struttura dell'oro è tale che la nuvola elettronica non è facilmente indotta ad oscillare a frequenze corrispondenti allo spettro visibile. La risposta degli elettroni diminuisce alle frequenze corrispondenti alla luce blu dello spettro. Pertanto, nell'oro e anche nel rame, l'efficienza di assorbimento della luce e la corrispondente riemissione diminuiscono verso l'estremità blu dello spettro. Di conseguenza quando l'oro è illuminato con luce bianca assume il caratteristico colore giallo (luce bianca meno la

componente blu dello spettro). La luce che non viene riflessa entra nella massa e viene dissipata all'interno del materiale. Se l'oro è sotto forma di un foglio sottile, di spessore inferiore a circa 100 nm, la maggior parte della luce verde- blu che entra viene trasmessa e osservata.

Le proprietà del colore dei metalli come descritto in precedenza cambiano drammaticamente quando la dimensione delle particelle diminuisce a circa 100 nm. In questo intervallo di dimensioni nanometriche, il moto degli elettroni è più strettamente accoppiato e il loro moto oscillatorio è vincolato dalle dimensioni della particella. Le proprietà di assorbimento-emissione della particella sono dominate dalle frequenze di risonanza della nube di elettroni. Questo movimento collettivo di risonanza della nuvola di elettroni si chiama risonanza plasmonica. Più piccola è la particella, più alta è questa frequenza di risonanza (cioè, più corta la lunghezza d'onda) in cui la nube di elettroni è in grado di assorbire e successivamente riemettere radiazioni elettromagnetiche. Particelle d'oro della dimensione di 10 nm assorbono, e successivamente riemettono luce nella gamma blu dello spettro. Pertanto, particelle sospese in questo intervallo di grandezza appaiono blu in riflessione e rosse in luce trasmessa. All'aumentare della dimensione della particella la luce di assorbimento e successiva riemissione si sposta verso lunghezze d'onda più lunghe e la trasmissione verso lunghezze d'onda più corte. In questo modo, con l'aumento delle dimensioni, il colore del metallo sotto forma di nanoparticelle cambia da rosso a blu in trasmissione, e dal blu al rosso in riflessione. Le proprietà ottiche delle nanoparticelle, come l'intensità e la risposta spettrale, dipendono da forma e dimensione delle particelle.

Proprietà di superficie delle nanoparticelle di metallo

Nelle particelle più grandi di circa 1.000 nm (1 μm) il numero di atomi sulla superficie è trascurabile rispetto al numero di atomi nel volume. Per una particella d'argento di diametro pari a 1000 nm è circa 3×10^{-10} (si veda l'Esercizio 2). Tuttavia, quando la dimensione delle particelle diminuisce, il numero di atomi superficiali rispetto al volume diventa significativo. Per una particella di 10 nm il rapporto tra il numero di atomi della superficie e quelli nel volume di massa è di circa $0.03 = 3\%$.

Poiché gli atomi sulla superficie di una piccola particella devono conformarsi ad una curvatura maggiore, la forza di legame tra gli atomi di superficie su una nanoparticella sono minori, cioè, gli atomi sulla superficie di una nanoparticella sono meno strettamente legati gli uni agli altri rispetto a quelli sulla superficie di una particella più grande. Il legame superficiale influisce anche sui legami all'interno della nano particella: quando gli atomi superficiali rappresentano una frazione significativa del numero totale di atomi, il passaggio da solido a liquido avviene ad una temperatura più bassa. Ad esempio, particelle di oro delle dimensioni di 10 nm fondono a $\sim 700^\circ\text{C}$, molto inferiore rispetto ai 1064°C che rappresentano il punto di fusione dell'oro. Questa differente reattività degli atomi di superficie delle nanoparticelle comporta alcune conseguenze che sono sfruttate nelle applicazioni mediche.

Superidrofilicità delle superfici delle nano-strutture

Le superfici nanostrutturate possono essere altamente idrorepellenti (idrofobe), ovvero

una superficie composta da nano-barrette relativamente distanti una dall'altra, può essere così idrofobica che una goccia di liquido non si attacca alla superficie e scivola via. Questa proprietà di cosiddetta super-idrofobicità può essere quantitativamente analizzata in termini di angolo di contatto tra una goccia di liquido e la superficie (vedi fig. 1).

L'angolo di contatto dipende dal tipo di liquido e dalla natura della superficie a contatto con il liquido. L'angolo di contatto per superfici idrofile è di circa 30° o meno. Una superficie è considerata idrofobica se l'angolo di contatto è maggiore di 90° . L'angolo di contatto per le superfici super-idrofobiche è in genere maggiore di 150° . Una superficie composta da nano-barre largamente distanziate consiste soprattutto di aria, che non presenta alcuna attrazione per acqua o altri liquidi. Le molecole del liquido sono attratte molto più fortemente tra loro rispetto a tale superficie. La superficie presenta quindi un comportamento super-idrofobico. Tali superfici sono autopulenti in quanto le particelle di sporco sulla superficie a bassa area di contatto sono facilmente raccolte da gocce d'acqua e eliminate.

Il comportamento super-idrofobico è stato osservato già migliaia di anni fa sulle foglie di diverse piante, in particolare il fiore di loto, tanto che la super-idrofobicità è spesso definita come "effetto loto". Immagini al microscopio elettronico delle foglie di loto mostrano una superficie composta da cristalli cerosi di dimensioni nanometriche. Anche se la pianta del loto cresce in ambienti umidi e fangosi, le sue foglie rimangono pulite ed asciutte. La *Alchemilla* mostrata in fig. 2 è un'altra pianta che presenta super-idrofobicità.

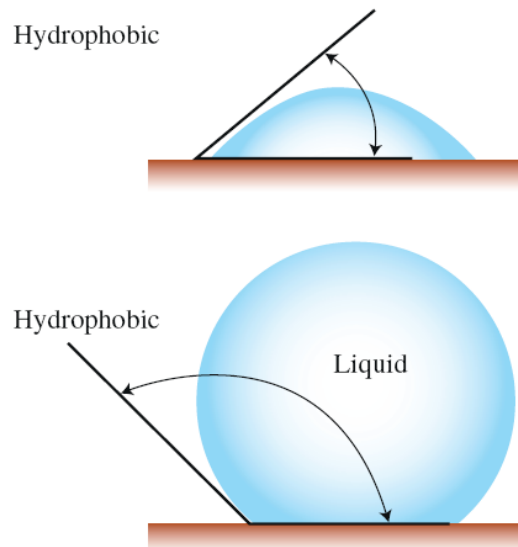


FIGURE 18.1 Contact angle on hydrophilic and hydrophobic surface.

Fig. 1 angolo di contatto su una superficie idrofilica e idrofobica.

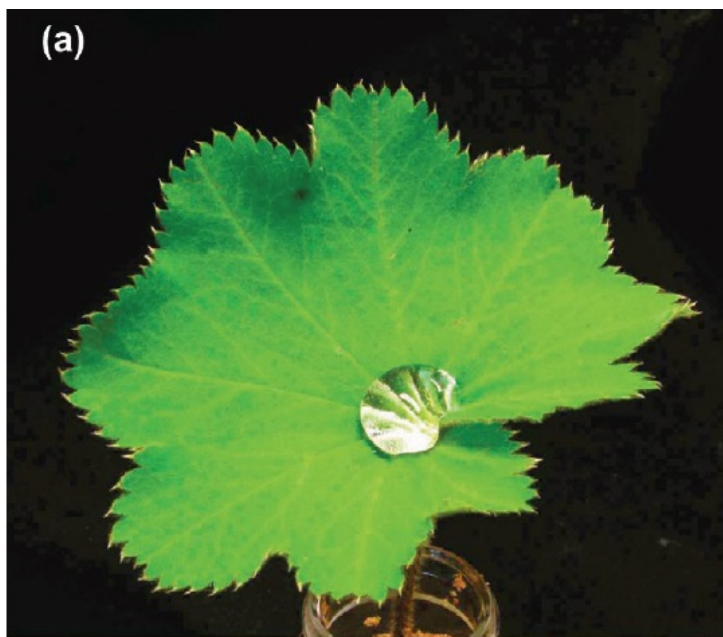


FIGURE 18.2 Leaf of a Lady's Mantle plant exhibiting superhydrophobicity.

Fig. 2 foglia di Alchemilla che presenta caratteristiche di super-idrofobicità

Le superfici superidrofobiche possono ora essere realizzate con tecniche ben sviluppate. Particelle con proprietà superidrofobiche vengono incorporate in un numero crescente di prodotti commerciali come vernici, tegole, e una varietà di rivestimenti come quelli utilizzati per le finestre autopulenti. Tessuti autopulenti rivestiti di nanofilamenti di silicone ed altri materiali idonei sono ora in attivo sviluppo commerciale (si veda l'Esercizio 3).

APPLICAZIONI MEDICHE DELLE NANOTECNOLOGIE

Nanoparticelle come biosensori

Un'importante applicazione delle nanotecnologie è la rilevazione e l'identificazione di molecole biologiche quali il DNA, alcune proteine e virus. Le tecniche dei biosensori più diffusamente utilizzate si basano sulle proprietà ottiche delle nanoparticelle d'oro.

Una di queste tecniche per la rilevazione di virus e la diagnosi di infezione virale è rappresentata schematicamente in fig.3. Gli anticorpi specifici per il virus target sono collegati a nanoparticelle d'oro. I complessi particelle-anticorpo sono introdotti in una fiala contenente il virus sospetto. Un laser illumina la fiala e viene rilevata la luce laser diffusa. Poiché il virus non diffonde la luce, la luce rilevata è quella caratteristica del complesso anticorpo-particelle. Un virus identificato dall' anticorpo, che si lega all'antigene virale, crea un nuovo complesso con frequenza plasmonica differente. La presenza del nuovo complesso si manifesta con una variazione della luce diffusa. Oltre a confermare la presenza del virus bersaglio, l'analisi della luce diffusa fornisce anche informazioni sulla carica virale. La modifica di questa tecnica può essere usata per rilevare il DNA e una ampia varietà di proteine.

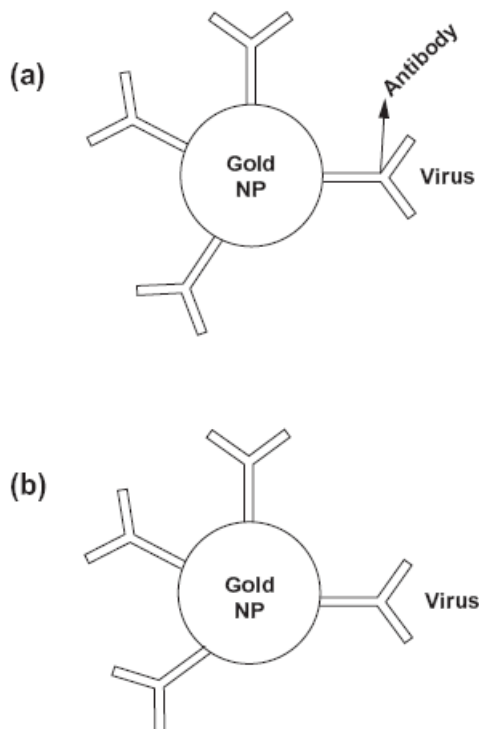


FIGURE 18.3 Detection of viruses. (a) Antibodies specific to the target virus are attached to gold nanoparticles and the particle-antibody complexes are introduced into a vial containing the suspected virus. Laser light (not shown) is scattered from the complex and is detected. (b) Virus locked onto the virus-specific antibody alters the scattered laser light. The change in the scattered light signals the presence and identity of the virus.

Fig. 3 rilevazione di virus. (a) anticorpi specifici per il virus bersaglio sono legati a nanoparticelle d'oro e i complessi particella-anticorpo sono introdotti in una provetta contenente il virus sospetto. Una luce laser (non mostrata in Figura) viene diffusa dal complesso e rivelata. (b) il virus bloccato nel complesso virus-anticorpo altera la diffusione della luce laser. La variazione nella luce diffusa segnala la presenza e permette l'identificazione del virus.

Le nanotecnologie nelle terapie anti tumorali

Lo sviluppo di tecniche per manipolare materiali su scala nanometrica ha permesso di ipotizzare una vasta gamma di applicazioni mediche che in precedenza non erano praticabili e immaginabili. In questa sezione presentiamo alcune delle applicazioni delle nanotecnologie nella terapia del cancro. La maggior parte di queste applicazioni sono ancora in fase di sviluppo, ma molti sono già gli studi clinici a riguardo. L'intento è quello di illustrare parte delle possibilità offerte dalla nanotecnologia. Le tecniche più promettenti di terapia del cancro che utilizzano le nanoparticelle sono quelle che riguardano il trasporto differenziato di particelle nel tumore. Queste cosiddette “terapie mirate” (o “targeted therapies”) si basano sulle differenze tra i vasi sanguigni che perfondono i tumori e quelli che perfondono le cellule dei tessuti sani. Nanoparticelle di dimensioni inferiori a circa 200 nm tipicamente utilizzate nella terapia mirata, non possono penetrare nei vasi sanguigni dei tessuti sani, mentre i vasi sanguigni tumorali, a causa della loro rapida crescita, sono maggiormente fenestrati, ossia presentano grandi pori superficiali che consentono a tali nanoparticelle di passare dal flusso sanguigno nel tessuto tumorale. Inoltre, poiché il drenaggio linfatico dei tumori è più lento, le nanoparticelle si accumulano prevalentemente nel tumore. Le proprietà specifiche delle nanoparticelle concentrate nel tumore possono così essere utilizzate per distruggere selettivamente il tumore, senza danneggiare il tessuto sano circostante.

Riscaldamento passivo mirato dei tumori (ipertermia)

Il riscaldamento passivo dei tumori è un'altra tecnica di distruzione mirata del tumore. Nanoparticelle progettate per assorbire la luce ad una determinata lunghezza d'onda vengono introdotte nel flusso sanguigno. Le nanoparticelle si disperdono attraverso i vasi sanguigni porosi nel tessuto tumorale. Il tumore viene quindi illuminato con luce laser della lunghezza d'onda adatta per il riscaldamento delle particelle e delle cellule dei tessuti circostanti. Le proteine riscaldate all'interno delle cellule tumorali iniziano a degradare la propria struttura (unfolding) e smettono di funzionare quando si raggiungono temperature di circa 43 °C. L'obiettivo è quello di distruggere le cellule tumorali senza danni eccessivi al tessuto circostante.

Se il tumore è superficiale l'intensità della luce nel vicino infrarosso trasmessa attraverso la cute può essere sufficiente per riscaldare e distruggere il tumore. Nei tumori localizzati più in profondità all'interno del corpo si possono usare opportune fibre ottiche per condurre la luce laser. Nanoparticelle con diverse caratteristiche sono in fase di sperimentazione per il riscaldamento del tumore. Il materiale più comunemente usato è l'oro: le nanoparticelle d'oro possono essere efficacemente riscaldate da luce laser rossa, ma altre configurazioni sono altrettanto possibili. In un recente studio sono state utilizzate nanoparticelle cave di oro incapsulate con materiale assorbente non conduttivo. La luce laser nel vicino infrarosso penetra attraverso il guscio e riscalda il materiale assorbente, il calore viene poi condotto nel tessuto circostante. Un altro gruppo di ricerca ha dimostrato un efficiente riscaldamento di nanoparticelle sotto forma di reticolo d'oro.

I tumori possono anche essere riscaldati utilizzando tecniche magnetiche. Nanoparticelle di materiali con proprietà magnetiche, come l'ossido di ferro ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), vengono introdotte nel tumore. Successivamente un campo magnetico alternato con una frequenza di qualche centinaio di KHz viene applicato al paziente, in modo che i nanomagnetici ruotino il proprio asse con la stessa frequenza del campo applicato. L'energia cinetica del movimento viene dissipata sotto forma di riscaldamento del tessuto circostante. Il tessuto sano non contiene materiale magnetico e pertanto non viene riscaldato dal campo applicato.

Rilascio mirato di farmaci

La chemioterapia è uno dei principali metodi di trattamento del cancro. Tuttavia, nella maggior parte dei casi le sostanze chimiche tossiche danneggiano sia i tessuti sani che quelli tumorali. L'efficacia della tecnica risulta migliorata in caso di maggiore selettività e diffusione della sostanza chimica tossica nelle cellule tumorali in rapida divisione. Poiché anche il tessuto sano è interessato almeno marginalmente, e spesso con gravi effetti collaterali, la quantità di sostanza chimica tossica che può essere somministrata è limitata. Il rilascio mirato di farmaci è stato sviluppato per massimizzare l'infusione del farmaco nel tumore, riducendo al minimo gli effetti collaterali della chemioterapia.

Un'ampia varietà di tecniche sono in fase di sviluppo per affrontare questo obiettivo importante. Descriveremo una di tali tecniche. In chemioterapia si studiano molecole che alterino letalmente il funzionamento della cellula tumorale. Dopo decenni di ricerca sono state scoperte molecole che sono efficaci e citotossiche per specifici tipi di cancro: una di queste tossine è la proteina chiamata "fattore di necrosi tumorale alfa" ($\alpha\text{-Tumor Necrosis Factor}$, $\alpha\text{-TNF}$), che causa l'infiammazione e la morte cellulare. La sostanza selezionata viene legata a nanoparticelle d'oro tramite un legame solfuro. Le nanoparticelle veicolanti la tossina vengono iniettate nel flusso sanguigno e si accumulano nel tumore. Tuttavia, affinché la terapia sia efficace è necessario un altro passo. Le particelle d'oro di per sé non vengono attaccate dal

sistema immunitario, ma la proteina citotossica a loro legata deve essere protetta, altrimenti il sistema immunitario distrugge la proteina prima ancora che venga veicolata al tumore. Sono state sviluppate alcune tecniche per mascherare la proteina dal sistema immunitario con un rivestimento del complesso particella d'oro- proteina con una forma di polietilene (PEG-THIOL).

Le nanoparticelle di Argento in medicina

Storicamente l'argento è stato utilizzato principalmente come metallo ornamentale e da conio, ma le sue proprietà medicinali sono note già a partire dall'antica Grecia e da Roma. L'esperienza ha dimostrato che il deterioramento di vino, latte, acqua e altri alimenti era significativamente ritardato se conservato in contenitori d'argento. Nel 4° secolo a.C. il medico greco Ippocrate ha descritto le proprietà dell'argento come antisettico nella cura delle ferite. Anche alcune infezioni gastro-intestinali erano trattate utilizzando posate e utensili d'argento.

Alla fine del 1800, Carl Credé introdusse l'argento, in forma di nitrato d'argento nella pratica medica moderna. Fino a quel momento, la congiuntivite settica neonatale causata da agenti infettivi, acquisiti dal neonato durante il passaggio attraverso il canale del parto, è stata una delle principali cause di danni permanenti, fino alla cecità, agli occhi dei neonati. In una serie di studi pubblicati nel 1884, Credé dimostrò che medicando gli occhi dei neonati con la soluzione di nitrato d'argento al 2% questa infezione veniva completamente eradicata. Prima del 1939 erano in uso più di 90 farmaci contenenti argento. Il trattamento delle infezioni oculari con nitrato d'argento è stato utilizzato fino agli anni 1950, quando fu sostituito da pomate antibiotiche. In queste applicazioni, l'attività antibatterica dell'argento è dovuta all'azione degli ioni argento (Ag^+) che interagiscono e perturbano il funzionamento delle pareti cellulari così come dei componenti interni dei batteri. Gli ioni argento mostrano però un alto livello di tossicità per l'uomo. Pertanto, con l'avvento degli antibiotici, l'uso dell'argento come medicinale è stato praticamente interrotto, con l'eccezione della pomata sulfadiazina d'argento introdotta nei primi anni 1970 che rimane uno dei trattamenti topici di scelta per le ustioni. Lo sviluppo di tecniche per la produzione di nanoparticelle d'argento e l'emergere di una vasta gamma di batteri resistenti agli antibiotici ha portato al riutilizzo dell'argento come agente battericida. Nanoparticelle di argento hanno dimostrato di avere un'attività antibatterica superiore ai soli ioni argento, in quanto sembra che, oltre alla attività antibatterica degli ioni argento, il contatto della nanoparticella d'argento con la superficie distrugga efficacemente le pareti cellulari del batterio. L'effetto battericida dipende da dimensione e forma delle nano particelle : in particolare le più piccole e sfaccettate (come l'ottaedro e il decaedro) sono più efficaci. Questa maggiore attività battericida è probabilmente dovuta alla maggiore reattività degli atomi di superficie. Inoltre, alcuni esperimenti ancora in corso indicano che, oltre alla attività antibatterica, le nanoparticelle di argento hanno anche notevoli proprietà anti-infiammatorie e attività anti-virali.

A causa dell'efficace attività battericida, l'utilizzo di nanoparticelle d'argento in medicina è in rapido aumento (Es 5). Un'applicazione importante e promettente è

quella relativa alla produzione di cateteri, ossia dei tubi inseriti nei vasi per fornire farmaci o in cavità del corpo per drenare i liquidi in eccesso. Essi sono comunemente utilizzati in molte procedure ospedaliere e, poiché parte del catetere è esposto all'aria aperta, i cateteri sono una causa frequente di infezioni ospedaliere. I rivestimenti di questi dispositivi con nano particelle d'Ag sembrano ridurre significativamente le infezioni batteriche. Anche le medicazioni rivestite con nanoparticelle di argento sono state dimostrate utili nel trattamento delle ferite poiché riducono l'infezione e l'infiammazione e accelerano la guarigione.

Il cemento osseo viene utilizzato per proteggere le protesi sostitutive dell'anca e del ginocchio: utilizzando il cemento convenzionale come agente di incollaggio, i tassi di infezione sono alti, tra l'1 e il 4%, mentre l'inclusione di nano particelle di argento nel cemento ha dimostrato di ridurre le infezioni di circa un fattore 2.

Utilizzo delle nanoparticelle nei prodotti di consumo e eventuali rischi

Il sito web dell'organizzazione " Project on Emerging Nanotechnologies" attualmente elenca oltre 1.300 prodotti che contengono nanoparticelle e la lista sta crescendo rapidamente. I rischi per l'ambiente, la salute e la sicurezza associati a questi prodotti sono però ancora in gran parte sconosciuti. L' Environmental Protection Agency del Consiglio Nazionale delle Ricerche Americano ha insediato un comitato per valutare i rischi legati alla nanotecnologia, il cui rapporto di 154 pagine, pubblicato sul web nel gennaio 2012, sottolinea la necessità di approfondire le problematiche di sicurezza dei prodotti contenenti nanoparticelle. Due aree in cui l'effetto delle nanoparticelle è quasi completamente sconosciuto sono l'ingestione e l'effetto della loro diffusione nell'ambiente.

Circa il 20% dei prodotti di consumo contenenti nanoparticelle, in un modo o nell'altro contengono nanoparticelle d'argento: borse, asciugamani, lenzuola, coperte, pantofole e una varietà di giocattoli per bambini. Secondo i produttori di nanoparticelle di argento queste forniscono benefici per la salute a causa dell'attività antibatterica e antimicotica dell'argento.

Mentre gli usi del nanoargento in applicazioni mediche sono certo benefici, e i prodotti medicali sono realizzati con cura e in condizioni controllate, i benefici dell'argento in molti altri prodotti di consumo sono discutibili, non sono stati dimostrati né sono stati valutati i loro rischi. Le nanoparticelle in questi prodotti hanno dimostrato di essere ingeribili, soprattutto se trattasi di componenti in vestiti e giocattoli per bambini. Nanoparticelle d'argento ingerite o mantenute in contatto con il corpo sono suscettibili, nel tempo, di danneggiare le colonie batteriche essenziali che sono indispensabili per il corretto funzionamento del corpo. Inoltre, ora è stato dimostrato che una frazione significativa delle nanoparticelle su capi di abbigliamento viene rimosso con ogni lavaggio. Queste particelle in un modo o nell'altro finiscono nel sistema idrico in cui è probabile che venga danneggiata la vita acquatica tra cui le colonie batteriche necessarie per la fertilità del suolo.

Le preoccupazioni per la salute non sono limitate alle nanoparticelle d'argento. A causa delle loro piccole dimensioni tutte le nanoparticelle hanno il potenziale di entrare nelle cellule e causare danni. La potenziale tossicità delle nanoparticelle contenute in un numero sempre crescente di prodotti deve essere esaminata, accrescendo la consapevolezza dei consumatori circa i possibili pericoli. (si veda l'Esercizio 6).

Esercizi

1. Confermare la dichiarazione nel paragrafo .1 relativa alle illustrazioni della scala metrica nel range nanometrico in termini di (a) confronto Terra- blocco di marmo e (b) tasso di crescita delle unghie.
2. (a) Si consideri una particella di argento di 10 nm di diametro composta da atomi di 0,3 nm di diametro. Calcolare il rapporto tra il numero di molecole di superficie e le molecole all'interno della particella. (b) Ripetere il calcolo per una particella 1 mm di diametro.
3. Quali materiali autopulenti con proprietà superidrofobiche a base di nanorivestimenti sono ora disponibili in commercio?
4. Indagine sullo stato di sperimentazioni cliniche per le tecniche di nanotecnologia descritto nel paragrafo .4.4.
5. Descrivere una recente applicazione medica delle nanoparticelle d'argento non discussa nel testo.
6. Esaminare lo stato attuale della ricerca sulla sicurezza dei prodotti contenenti nanoparticelle.