



PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
Comitato Nazionale per la Bioetica

NANOSCIENZE E NANOTECNOLOGIE

Approvato nella seduta Plenaria del 9 giugno 2006

Sommario: Presentazione - 1. Introduzione - 2. Nanotecnologie e salute: le “nanobiotecnologie” - 3. Profili critici delle nanobiotecnologie – 4. L’adeguatezza delle metodologie esistenti per la valutazione dei rischi associati ai prodotti delle nanotecnologie – 5. Orientamenti di politica normativa – 6. Sintesi e raccomandazioni bioetiche – Bibliografia essenziale.

PRESENTAZIONE DEL PRESIDENTE DEL C.N.B.

Su proposta del Prof. Luca Marini, nella seduta plenaria del 23 aprile 2004, il *Comitato Nazionale per la Bioetica* prese la decisione di attivare un gruppo di lavoro dedicato ai problemi bioetici sollevati dal diffondersi delle *nanoscienze* e dal conseguente imporsi di nuove, e spesso inimmaginabili da parte del sentire comune, *nanotecnologie*. Al gruppo decisero subito di aderire i Proff. Salvatore Amato, Demetrio Neri, Adriano Bompiani, Paola Binetti, Isabella Coghi e Renata Gaddini e successivamente il Prof. Silvio Ferrari e la Dott.ssa Laura Guidoni. Dal 27 maggio 2004 fino al 16 marzo 2006 il gruppo si è riunito ben quattordici volte, attivando altresì preziose audizioni di esperti esterni. Hanno infatti collaborato col Comitato, e qui doverosamente vengono ringraziati per la grande generosità e la sincera amicizia che hanno dimostrato, il Dott. Renzo Tomellini, chimico, capo dell’unità nanoscienze e nanotecnologie presso la commissione europea; il Prof. Paolo Milani (Dipartimento di Fisica dell’Università degli Studi di Milano – Centro di eccellenza sulle Nanotecnologie); il Prof. Enzo di Fabrizio (Università Magna Grecia di Catanzaro, membro dell’Area Science Park di Trieste); il Dott. Guido Rasi (CNR); il Prof. Mauro Ferrari (Ohio State University -Istituto di nanotecnologie e microtecnologie per l’applicazione biomedica- e Università di Pisa).

La bozza del documento, elaborata dal Prof. Marini (al quale va il caloroso ringraziamento di tutto il Comitato per l’impegno messo nell’elaborare un testo di notevole complessità), è stata sottoposta all’attenzione del CNB, riunito in seduta plenaria, nelle riunioni di aprile e maggio 2006. Con alcune variazioni, nate dalle intense discussioni di gruppo sollevate in plenaria, il testo è stato infine, il 9 giugno 2006, approvato all’unanimità.

Chi leggerà questo documento potrà immediatamente percepirne il carattere più appariscente, che è quello di un’ariosa e completa introduzione a una lunga e sottile serie di tematiche bioetiche di frontiera, per la maggior parte ancora non percepite dal grande pubblico. Sotto questo profilo, è lecito ritenere che con questo documento il CNB ha svolto un’autentica opera pionieristica. Al di là però di questa funzione informativa, che il CNB ha sempre ritenuto proprio dovere esercitare, il documento si raccomanda però per la precisione con cui mette a fuoco numerose e spinose questioni bioetiche, la cui soluzione (se non definitiva, almeno plausibile) sarà resa possibile solo da ulteriori esperienze e da ancor più ricche riflessioni scientifiche. Bisogna infatti accettare un dato che l’impazienza di molti bioeticisti disconosce e cioè che non tutte le questioni bioetiche (e in particolare le più nuove) sono tali da ricevere in tempi brevi soluzioni convincenti al punto tale da meritare di essere ritenute consolidate. Compito dei bioeticisti, in molti casi di frontiera, come quelli affrontati in questo documento, non è quello di offrire all’opinione pubblica certezze etiche, ma quello di descrivere con esattezza e precisione la rilevanza problematica di tematiche destinate a restare aperte forse per tempi molto lunghi. E’ per questo, forse, che più che ingenue fughe in avanti si addicono ai bioeticisti attente valutazioni prudenziali.

Prof. Francesco D’Agostino
Presidente del *Comitato nazionale per la bioetica*

1. INTRODUZIONE

Nate da qualche decennio¹, le “nanoscienze” e le “nanotecnologie” interessano particelle la cui grandezza è nell’ordine del nanometro, equivalente ad un milionesimo di metro (o, se si preferisce, un milionesimo di millimetro), una dimensione inferiore decine di migliaia di volte allo spessore di un capello umano².

Il termine nanoscienze è invalso nell’uso per indicare le numerose e diverse aree scientifiche (fisica, chimica, biologia) di interesse delle nanotecnologie, che dovrebbero permettere originali applicazioni industriali e commerciali nei più diversi settori, dalla medicina alle tecnologie dell’informazione e della comunicazione, dalla produzione di energia a quella di nuovi materiali. Una branca delle nanotecnologie, quella più conosciuta nel campo biomedico, è dedicata alla costruzione di dispositivi su scala molecolare, mediante il trasferimento del laboratorio di sintesi sulla scala nanometrica (nanotecnologie molecolari). Esistono poi le nanostrutture, che costituiscono, oggi, la frontiera della miniaturizzazione e presentano applicazioni soprattutto in campo elettronico. Infine vengono sviluppati i materiali nanostrutturati, che comportano l’introduzione di materiali della dimensioni di qualche decina di nanometro in prodotti quali la ceramica o l’acciaio, allo scopo di migliorarne le caratteristiche.

Poiché le nanotecnologie hanno ad oggetto la manipolazione di materiali su scala atomica e molecolare, la dimensione nanometrica del materiale manipolato dischiude orizzonti applicativi impensabili in passato, perché le proprietà osservabili a tale dimensione si prestano ad essere utilizzate, anche su scala diversa, per sviluppare processi e prodotti caratterizzati da nuove funzioni e prestazioni, in un numero tendenzialmente illimitato di settori³.

Si pensi, solo per fare alcuni esempi, alle possibilità diagnostiche e terapeutiche (in particolare i dispositivi miniaturizzati da impiantare nel corpo umano a scopo di diagnosi precoce delle malattie o i materiali capaci di migliorare la biocompatibilità degli organi trapiantati), alle applicazioni nel campo delle tecnologie dell’informazione e della comunicazione (come nel caso dei supporti di immagazzinamento dei dati ad altissima densità di registrazione), ai dispositivi elettronici molecolari e, più in generale, ai nuovi “nanomateriali” caratterizzati da proprietà originalissime e diverse, come quelli antigraffio e autopulenti o dotati di eccezionali gradi di resistenza alle più diverse sollecitazioni. Alcuni di tali prodotti, peraltro, sono già stati immessi in commercio: bendaggi e valvole cardiache, componenti elettronici, tessuti antipioggia e antimacchia, vernici antigraffio, creme solari e cosmetici stanno entrando nelle abitudini di consumo dei cittadini europei e hanno raggiunto un valore di mercato stimato attorno ai 2,5 miliardi di euro⁴. Meno conosciute sono, invece, talune potenzialità applicative delle nanotecnologie nel settore alimentare (con particolare riferimento alla tracciabilità degli alimenti mediante l’utilizzo di sistemi miniaturizzati di etichettatura), della produzione e della conservazione dell’energia (le nuove celle a combustibile o i nuovi solidi nanostrutturati leggeri, in grado

¹ Cfr. le previsioni di R. FEYNMAN risalenti alla fine degli anni Cinquanta del Novecento: *There's Plenty of Room at the Bottom*, in *Eng. and Sci.*, 1960, n. 23, p. 22. Scenari di sviluppo applicativo di tale tecnologia sono stati prospettati, diversi anni più tardi, da K. E. DREXLER, *Engines of Creation. The Coming Era of Nanotechnology*, Anchor, New York, 1986 e ID., *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation*, 1992.

² Nel sistema internazionale di misura, il prefisso “nano” indica 10^{-9} , ossia un milionesimo di unità (0,000000001).

³ Va appena precisato che quanto detto vale anche per le nanoscienze e per i principi scientifici che possono essere dedotti sulla base dello studio dei fenomeni osservabili in scala nanometrica.

⁴ Stime attendibili prevedono, entro il 2015, lo sviluppo di un volume di affari pari a centinaia di miliardi di euro all’anno: cfr. il documento del DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY, *New Dimensions for Manufacturing: a UK strategy for nanotechnology*, London, 2002, p. 24. Attualmente, la spesa mondiale per la ricerca nel settore ammonta a 7 miliardi di euro all’anno (fonte: La Repubblica del 27 marzo 2006, p. 14). Nella sola Unione europea, il sostegno finanziario fornito dai Programmi quadro comunitari di ricerca scientifica e sviluppo tecnologico passerà da 1300 milioni di euro per il periodo 2002-2006 (VI Programma quadro) a circa 4800 milioni di euro per il periodo 2007-2011 (VII Programma quadro).

di garantire efficienti sistemi di immagazzinamento dell'idrogeno), della protezione ambientale (tecniche fotocatalitiche basate sulle nanotecnologie) e della sicurezza (sistemi di rilevazione selettiva di agenti chimici o batteriologici e tecniche, quali la marcatura delle banconote, in grado di accrescere la protezione di determinati beni)⁵.

Sul piano concettuale, l'approccio interdisciplinare (o "convergente") alle nanotecnologie ruota intorno a due metodiche alternative: la prima, fondata essenzialmente su processi di assemblaggio, consiste nella miniaturizzazione dei materiali o dispositivi (c.d. approccio *top-down*), mentre la seconda, fondata su processi di sintesi, è volta a creare nuove strutture partendo dal livello atomico e molecolare (c.d. approccio *bottom-up* o "tecnologia atomica"). E' soprattutto la seconda metodica, sebbene ancora allo stadio embrionale, che sembra destinata a "rivoluzionare" gli attuali processi produttivi, contribuendo significativamente al risparmio di materie prime ed alla riduzione dell'emissione di sostanze inquinanti durante l'intero ciclo di vita dei nuovi prodotti.

La varietà e la molteplicità delle applicazioni ricordate fanno delle nanotecnologie vere e proprie "tecnologie orizzontali" o "capacitanti", perché in grado, come da più parti rilevato, di permeare ogni settore tecnologico. Ciò richiede e comporta un approccio interdisciplinare, necessario per coniugare conoscenze e competenze diverse ai fini della ricerca scientifica e dello sviluppo delle relative applicazioni tecnologiche: dalla chimica alla fisica, dall'ingegneria alla biologia, dall'informatica alla genetica. E' quindi agevole comprendere perché l'intera comunità scientifica (ma anche e soprattutto l'industria e, più in generale, il grande pubblico) guardi alle nanotecnologie come alle "tecnologie del futuro" ed invochi per esse il più ampio sostegno economico, finanziario e, non ultimo, politico-istituzionale.

Accanto all'entusiasmo di molti, e pur condividendo il giudizio secondo cui la capacità di operare alle dimensioni della "nanoscala" costituisce un trionfo dell'ingegno umano, si rileva anche la prudenza di chi ritiene di potere individuare taluni profili di criticità delle nanotecnologie. Per queste tecnologie, come del resto per tante altre, si avverte infatti l'esigenza di valutare non solo i vantaggi che esse potranno apportare in termini di miglioramento della qualità della vita, ma anche i rischi (in specie per l'ambiente e la salute umana) collegati o conseguenti allo sviluppo delle applicazioni nanotecnologiche. D'altra parte, diffusa appare la percezione pubblica dei rischi reali o presunti relativi alle nanotecnologie, anche perché di recente alimentata da certi filoni della stampa e della letteratura che hanno rappresentato con successo, apparentemente senza distorcere i dati disponibili sul piano scientifico, scenari narrativi in cui il rilascio nell'ambiente di invisibili nanoparticelle si traduce in minacce esiziali per la sopravvivenza del genere umano⁶.

Appare dunque evidente la necessità di favorire, anche in materia di nanoscienze e nanotecnologie, un dibattito aperto e costruttivo tra scienza e società, che permetta di distinguere i dati scientifici dal sensazionalismo o, all'opposto, da timori infondati sulle conseguenze sanitarie, di sicurezza, ambientali e sociali di queste nuove tecnologie. Oltre che fornire un primo studio organico e sistematico sulle implicazioni bioetiche delle nanotecnologie e delle "nanobiotecnologie", con il presente *Parere* il C.N.B. intende favorire la più ampia diffusione e la più agevole comprensione dei temi trattati anche da parte di un pubblico non specialistico, coerentemente con le proprie finalità istituzionali. Allo scopo, il *Parere* descrive anzitutto le principali applicazioni (immediate e ipotizzabili) delle nanotecnologie nel campo della biomedicina (§ 2), per poi valutare taluni profili critici delle nanobiotecnologie (§ 3) e l'adeguatezza delle metodologie esistenti per la valutazione dei rischi - in specie di natura tossicologica ed ecotossicologica - associati ai prodotti delle nanotecnologie (§ 4). In seguito saranno esaminati gli orientamenti di politica normativa seguiti sul piano internazionale e

⁵ Per una panoramica sulle diverse applicazioni delle nanoscienze e delle nanotecnologie si rimanda, per un primo approccio, ai documenti della Commissione europea *Verso una strategia europea infavore delle nanotecnologie e Nanoscienze e nanotecnologie: Un piano d'azione per l'Europa 2005-2009*, su cui si tornerà più avanti.

⁶ Si veda, per tutti, il *best-seller* di M. CRICHTON, *Preda*, Milano, 2002.

comunitario (§ 5), mentre il paragrafo conclusivo (§ 6) proporrà la sintesi del documento e le raccomandazioni bioetiche.

2. NANOTECNOLOGIE E SALUTE

Aspetti potenzialmente “positivi” delle applicazioni delle nanobiotecnologie

L'applicazione delle nanotecnologie in campo biomedico si propone l'obiettivo di realizzare un monitoraggio completo e continuo dell'organismo umano e di contribuire alla tutela della salute, lavorando a livello molecolare per ottenere benefici medici e clinici mediante l'utilizzo di nanodispositivi e nanostrutture. In particolare, il rapporto dell'*European Science Foundation* sulla nanomedicina del febbraio 2005⁷, individua tre grandi filoni nello sviluppo della ricerca sulla produzione di nanomateriali e di nanodispositivi: l'ottimizzazione delle tecnologie già esistenti per una più completa applicazione nel settore medico; lo sviluppo di nuovi sistemi multifunzionali per la diagnosi delle malattie e la somministrazione mirata dei farmaci; un aumento delle competenze e delle conoscenze che consenta di produrre materiali sempre più affidabili, specializzati, riproducibili, aumentando l'efficacia e riducendo i costi.

Secondo le affermazioni che abbiamo potuto raccogliere dalla letteratura, spesso ancora del tutto futuribili e allo stato di congetture, lo sviluppo della capacità di utilizzare nano particelle in medicina apre nuove strade. Un esempio importante, tra quelli citati, riguarda le nanoparticelle d'oro, in quanto è stato dimostrato che possono agire da "accentratori" di calore, dando luogo ad un surriscaldamento nella regione selezionata che risulta letale per le cellule circostanti⁸.

Attraverso l'uso di bio-linker, le nanoparticelle possono essere progettate in modo da agire su bersagli definiti. L'idea di utilizzare come trasportatori di farmaci antitumorali vescicole o particelle virali rivestite di molecole in grado di indirizzare il vettore verso le cellule da eliminare selettivamente non è nuova. Le molecole biolinker vengono adsorbite o inglobate in nanoparticelle e che sono in grado di legarsi a specifiche cellule o tessuti, indirizzando in tal modo le nanoparticelle e il loro contenuto negli organi bersaglio. Ad oggi tuttavia, esistono ancora pochi studi clinici, destinati ad aumentare rapidamente⁹.

Oltre a potenziare, come in questo caso, le tecniche già esistenti, le nanobiotecnologie dovrebbero consentire di costruire molteplici dispositivi sensibili di analisi e di misurazione *in vitro*, di produrre nuovi tessuti ed organi artificiali, di addestrare sistemi biologici a riparare altri sistemi biologici a supporto della medicina rigenerativa⁹, di ideare “3-D display” per l'emissione di segnali biomolecolari, sensori e meccanismi per il controllo telemetrico mobile e *in vivo*, di elaborare sistemi multifunzionali di diagnosi collegati alla somministrazione intelligente di farmaci, di affinare i metodi bioanalitici di comprensione dei meccanismi di funzionamento dei sistemi cellulari e molecolari.

⁷ Cfr. *European Science Foundation Policy Briefing*, n. 23, February 2005.

⁸ Nella recente letteratura si veda Zharov, V. P., M. Everts, D.T. Curiel, J.W. Kim. Integrated Photothermal Nanodiagnosics and Therapy with Gold Nanoclusters. *Nanomedicine*, 2005, Enhancement of tumor thermal therapy using gold nanoparticle-assisted tumor necrosis factor- α delivery Rachana K. Visaria, Robert J. Griffin, Brent W. Williams, Emad S. Ebbini, Giulio F. Paciotti, Chang W. Song, and John C. Bischof *Mol Cancer Ther* 2006 5: 1014-1020.

⁹ Un "ponteggio" nanotecnologico che permetta ai tessuti nervosi lacerati di ricostituirsi e tornare a svolgere le funzioni fisiologiche originarie è l'idea alla base del progetto di un'equipe di ricercatori del MIT, i cui positivi risultati sono stati recentemente pubblicati su *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Dynamic reassembly of peptide RADA16 nanofiber scaffold. H. Yokoi, T. Kinoshita, and S. Zhang (2005). *PNAS* 102: 8414-841). Il gruppo ha identificato un peptide che si riorganizza, tornando ad assumere la stessa forma di "ponteggio" di nanofibre, di lunghezza e larghezza simili a quelle originarie, anche dopo essere stato frantumato con gli ultrasuoni. Il procedimento è stato ripetuto con successo per quattro volte. Il lavoro autorizza a ipotizzare importanti sviluppi, per esempio nella creazione di nuove strutture per colture cellulari 3D, per la riparazione dei tessuti in medicina rigenerativa, per la terapia di gravi patologie plegiche e neurodegenerative.

Si presume che, in breve tempo, si possa arrivare, attraverso gli strumenti di analisi che utilizzano nanoimmagini, a conoscere l'inizio e la progressione di una malattia, monitorando in termini reali e *in vivo* i processi cellulari e molecolari. Un marker biotecnologico per identificare lo stress dei neuroni è in fase di elaborazione da parte di una rete internazionale di ricercatori, secondo uno studio apparso di recente su *The Journal of Experimental Medicine*. Secondo questo studio, la mutazione di un gene che regola la proteina Eaat2 indica una presenza ridotta del neurotrasmettitore che, se poco concentrato, spesso annuncia la possibilità che le cellule nervose si ammalinino. Se applicato su larga scala, il *marker* potrebbe favorire la prevenzione delle malattie del sistema nervoso centrale, spesso seguite da sindromi cardiovascolari altrettanto gravi, che riducono l'apporto di nutrimenti ed ossigeno ai tessuti.

Sarà inoltre possibile individuare nuovi obiettivi biologici per le analisi e le terapie, un più rapido passaggio dalla sperimentazione sugli animali all'applicazione clinica per gli esseri umani, la chiusura del *gap* tra le tecnologie molecolari e cellulari e la diagnosi clinica. Nel lungo periodo, si dovrebbe arrivare a progettare nanostrumenti di analisi *in vivo* e non invasivi con un elevato livello di sensibilità, riproducibilità e affidabilità per utilizzarli nel rilevare i sintomi di malattie, nella progettazione e sintesi di nuove molecole, nell'analisi di tutte le componenti sub-cellulari a livello molecolare, nel potenziamento di funzioni cellulari di supporto al sistema immunitario. Particolarmente preziose appaiono le indicazioni che si potrebbero ottenere per identificare i profili di espressione genica responsabili di specifici orientamenti differenziativi in cellule staminali multipotenti.

Queste nuove prospettive terapeutiche e farmacologiche saranno possibili attraverso la messa a punto di nanocapsule a composizione particolare che, superando le barriere biologiche, siano in grado di trasportare il farmaco e di rilasciarlo in maniera mirata. E' ipotizzabile l'ideazione, nel lungo periodo, di sistemi sintetici bioreattivi non solo idonei al trasporto intracellulare di macromolecole a scopo terapeutico, ma anche capaci di autoregolarsi, dando vita a nanostrutture costituite da biosensori accoppiati a meccanismi di trasporto¹⁰. La progettazione di supporti nanostrutturati (ad esempio, tessuti biologici artificiali) sensibili potrebbe, inoltre, consentire la rilevazione immediata e il controllo nel tempo del manifestarsi di fenomeni degenerativi, impedendo il diffondersi del cancro, delle malattie neurovegetative, cardiovascolari, polmonari, oculari ed altre ancora.

Cosa si conosce sui rischi per la salute dei prodotti nanotecnologici?

Di fronte ad un panorama così invitante, non mancano, sempre in letteratura, riflessioni più prudenti. L'alto rapporto superficie/massa, le dimensioni "atomiche" e la facilità con cui le nanoparticelle possono assorbire e veicolare altre sostanze: proprio le caratteristiche che rendono attraenti i nanomateriali, suggeriscono anche una certa prudenza nel loro utilizzo in campo biomedico. Infatti, se l'estrema penetrabilità delle nanoparticelle costituisce il segreto delle loro potenzialità, non vanno sottovalutati i rischi connessi alla nano-dimensione, visto che da più parti si sottolinea come non siano ancora chiare le possibili interazioni tra le nanoparticelle e l'organismo umano. Poco conosciuti, ad oggi, sono gli effetti che materiali delle dimensioni paragonabili a quelle di un atomo hanno sull'organismo umano: e quel poco che si sa, pur essendo estremamente

¹⁰ Al riguardo, è possibile evocare scenari come quelli descritti da A. DIASPRO, *Nanobiorobot. Oltre la fantascienza*, in *Darwin*, 2005, p. 54 e ss. Nella letteratura scientifica, si veda Role of nanotechnology in targeted drug delivery and imaging: a concise review Otilia M. Koo, Israel Rubinstein, Hayat Onyuksel, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine* 1 (2005) 193– 212; Nanotechnology, nanomedicine, and the development of new, effective therapies for cancer Ernest S. Kawasaki, Audrey Player, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine* 1 (2005) 101– 109; Donaldson K, Tran CL., An introduction to the short-term toxicology of respirable industrial fibres. *Mutat Res.* 2004 Sep 3;553(1-2):5-9.

promettente sul piano delle possibili applicazioni, appare non del tutto rassicurante in rapporto alla possibilità di effetti collaterali indesiderati, anche gravi¹¹.

Viene replicato che l'uso di sostanze a dimensioni submicroniche nell'industria farmaceutica ha da tempo dimostrato il grado di interazione con i sistemi biologici e ha permesso di stabilire le prime regole di sicurezza in materia. Sono però soprattutto gli studi più recenti sulle polveri ultrasottili (quelle dalle dimensioni inferiori al decimo di micron), e in special modo quelli relativi alle frazioni più piccole di queste classi di *aerosol*, a destare le maggiori preoccupazioni e ad orientare il percorso delle prime indagini specifiche. Le polveri ultrafini derivate dalla combustione del carbone, il nerofumo, il particolato dei motori diesel ed i fumi di saldatura: sono questi i materiali contenenti significative frazioni dalle dimensioni dell'ordine dei nanometri sui quali si hanno già buone conoscenze relative ai loro effetti avversi sulla salute (anche se alcuni di tali materiali, considerati per lo più inquinanti indesiderati, spesso non sono sottoposti a test specifici). Alle sostanze elencate, e considerate pericolose, si aggiungono poi materiali espressamente prodotti e già commercializzati: creme protettive solari a base di biossido di titanio, vetri autopulenti e isolanti (anch'essi a base di TiO₂), materiali per favorire e prolungare alcuni processi catalitici, nanotubi metallici semiconduttori, pigmenti e *toner* al nerofumo, *filler* contenenti silicati amorfi, nanoparticelle organiche utilizzate nell'industria farmaceutica ed altri ancora. Non risulta che questi materiali vengano considerati pericolosi.

Occorre, tuttavia, riportare anche ulteriori affermazioni. I nanomateriali già di larga produzione (o "bulk NP", ove NP sta per Nano Particles), sono più noti e più sperimentati (anche per quanto riguarda i potenziali effetti avversi) rispetto agli "engineered NP". Molto avanzate sono tuttavia, tra questi ultimi, le conoscenze relative ai nanotubi, originariamente considerati quali varietà di fullereni, ma rivelatisi anche curiosità morfologiche nell'ambito dei particolati naturali del carbone¹². Sono specialmente i nanotubi, e le loro potenziali applicazioni (persino come vere e proprie attrezzature per operare nell'ultrafino), a generare i rischi meno noti e potenzialmente più temibili. La principale preoccupazione segnalata è che, come è già stato dimostrato in altri ambiti, materiali non tossici sotto forma di particelle abbastanza grandi possono risultare dannosi alla dimensione nanometrica. Che la dimensione delle particelle inalate rilevi è ormai un fatto noto. Delle famigerate polveri sottili, frutto della combustione di benzina e gasolio, che costituiscono uno degli elementi principali dell'inquinamento urbano, si sa già che più sono piccole, più sono dannose. Le PM 2,5 (ove PM sta per "Particulate Matter, materiale particolato"), con diametro inferiore a 2,5 micron, producono effetti peggiori delle PM 10: raggiungono infatti le parti più profonde dei polmoni e sembrano in grado di causare tumori. Se, come sembra, l'effetto biologico dipende dalla superficie esposta, a parità di dose più le particelle sono piccole, maggiore è il pericolo. Un tossicologo della Nasa, Chiu-Wing Lam, ha studiato l'effetto dei nanotubi di carbonio, molecole scoperte all'inizio degli anni Novanta del secolo passato, che si prevede daranno materiali cento volte più resistenti e sei volte più leggeri dell'acciaio, oggi prodotti solo in piccole quantità. Instillando nei polmoni di topi una sospensione di nanotubi aggregati, operazione considerata non proprio equivalente all'inalazione, ma più facile da eseguire in modo controllato, gli animali hanno avuto la stessa reazione di irritazione causata dalla polvere. Quando i nanotubi sono stati somministrati sotto forma di particelle separate, nei

¹¹ Sono qui ripresi i risultati emersi dal primo Simposio internazionale sulle implicazioni dei nanomateriali per la salute dei lavoratori, organizzato dall'Health and Safety Executive e dal National Institute for Occupational Safety and Health britannici e tenutosi il 12-14 ottobre 2004 a Buxton, nel Regno Unito.

¹² A differenza del diamante e della grafite, solidi a reticolo infinito, i fullereni costituiscono l'unica forma finita del carbonio. Nell'ottobre del 1996 è stato assegnato il premio Nobel per la chimica ai ricercatori Harold Kroto, Robert F. Curl e Richard E. Smalley per la scoperta del fullerene (da taluni chiamato anche "*buckyball*"), che prende nome dall'architetto statunitense Buckminster Fuller, noto per i suoi progetti di moduli abitativi a forma di cupola geodetica basata su pentagoni ed esagoni.

polmoni si sono però verificate lesioni. I nanotubi sono inoltre particelle lunghe e sottili. Nel caso dell'amianto, la forma fibrosa è uno dei fattori più critici. Potrebbe essere lo stesso per i nanomateriali? Alcune ricerche condotte negli anni passati – e, secondo l'Associazione GreenPeace, ignorate dai media - avrebbero dato risultati preoccupanti: inalando una dose di nanotubi di 5 milligrammi per kg di peso corporeo, il 15 per cento degli animali è morto, ma non a causa della tossicità della sostanza. I nanotubi si sono aggregati fino a ostruire i bronchi dei ratti, che sono rimasti soffocati¹³. Il danno biologico può quindi dipendere, con effetti diversi, sia dalle dimensioni delle nanoparticelle, che dallo stato di aggregazione delle stesse.

Altri studi hanno riguardato sistemi molecolari utilizzati per portare farmaci oltre la barriera ematoencefalica o all'interno delle cellule. Finora non sono stati osservati effetti dannosi, ma le ricerche in questi ambiti sono assai scarse. Il Center for biological and environmental nanotechnology della Rice University (Usa) è tra i principali laboratori dove si studia l'impatto ambientale. Qui si è osservato come le *buckyball*, molecole costituite da 60 atomi di carbonio¹⁴, “viaggiano” sul suolo: sembra che, se riescono ad aggregarsi, vengano assorbite come qualunque altro composto organico, ma che, lasciate libere di disperdersi, penetrino nel terreno senza essere assorbite. Uno dei timori è che tali molecole possano così legarsi ad altri contaminanti, come pesticidi, e magari penetrare nell'organismo di vermi o altri animali, entrando nella catena alimentare.

Prevenzione sui luoghi di lavoro e per l'ambiente: stato attuale delle conoscenze

Per ora, gli unici soggetti a rischio di inalare i nanotubi sono coloro che li producono: i ricercatori di 16 aziende al mondo. Alcune società giapponesi hanno però annunciato di volerne iniziare la produzione su larga scala e gli esperti giudicano molto vasto il potenziale mercato rilevante. L'obiezione alle critiche sollevate in merito alla sicurezza è che nei laboratori si prendono le necessarie precauzioni e che, in ogni caso, i nanotubi non sono fatti per... essere respirati.

Nell'igiene del lavoro è ormai consolidata la distinzione delle polveri a seconda della loro granulometria (o, più esattamente, a seconda del loro “diametro equivalente”) in base alla possibilità che esse hanno di raggiungere i vari tratti dell'apparato respiratorio e di esservi trattenute. Le particelle le cui dimensioni sono tra i 5 micron e i 0,5 micron fanno parte della c.d. “frazione respirabile”. Le particelle di dimensioni inferiori, e specialmente quelle estremamente sottili, fino a circa un decennio fa erano considerate alla stregua di sostanze inerti: si riteneva, cioè, che esse venissero inalate ed espirate senza interferire con le strutture degli epiteli polmonari. In particolare, la ridotta interazione di tali particelle con i classici meccanismi di rimozione dell'albero respiratorio (mucociliare, macrofagico e linfatico) faceva ritenere del tutto insignificante la partecipazione di esse alla patogenesi del danno polmonare.

La fisica ha da tempo dimostrato che le polveri ultrasottili sono tenute in sospensione dal moto browniano: esse, pertanto, non sono soggette a caduta inerziale o a sedimentazione e tendono a permanere indefinitamente sospese nell'aria, da cui sono rimosse soltanto dalle correnti o dalle piogge. Inoltre, proprio in virtù del moto browniano, la distribuzione di tali polveri nello spazio dipende unicamente dal meccanismo della diffusione. Deriva da ciò che l'igiene ambientale e la stessa normativa tecnica che regola il campionamento dell'aria confinata e ne definisce le classi (UNI-EN 481) ha di fatto trascurato (e, indirettamente ma sostanzialmente, sottostimato) le frazioni ultrasottili. Il Comitato Europeo di Normazione, consapevole di ciò, ha da tempo messo in guardia gli analisti, sottolineando in particolare la difficoltà di applicare le regole della “convenzione per il campionamento” qualora si vogliano campionare e caratterizzare i fumi di saldatura. Rinviando al prosieguo della trattazione la valutazione dell'adeguatezza

¹³ Si veda quanto riportato da C. PALMERINI, *Nanoinquinamento*, in *Panorama* del 26 settembre 2003.

¹⁴ La *buckyball*, la componente base del fullerene, è costituita da 60 atomi di carbonio disposti in 20 esagoni e 12 pentagoni, come un pallone da calcio. Quando questa struttura viene forzata ad allungarsi, mediante vari procedimenti chimico-ottico-elettrici, si forma un nanotubo.

delle metodologie esistenti per la valutazione dei rischi associati ai prodotti delle nanotecnologie, occorre anticipare fin d'ora che particelle di dimensioni inferiori a 0,5 micron, il cui assorbimento è regolato pressochè esclusivamente dalla diffusione, dovrebbero essere valutate utilizzando, in luogo del criterio del "diametro equivalente", quello del c.d. "diametro diffusivo".

Soltanto in anni più recenti, e soprattutto nell'ambito degli studi sull'inquinamento atmosferico delle aree urbane, dati epidemiologici e sperimentali hanno richiamato l'attenzione sulle polveri sottili: le ormai note PM 10 e in special modo le frazioni inferiori (le PM 2,5 - che delle PM10 rappresentano circa il 60% - e le PM 1)¹⁵.

Vi sarebbero due punti critici dell'apparato respiratorio attraverso i quali, essenzialmente per diffusione, le nanoparticelle penetrano nell'organismo: durante i moti turbolenti dell'aria a livello delle coane nasali ed a livello alveolare, dove invece l'aria è in "calma piatta". Attraversando con facilità l'epitelio alveolare e l'endotelio, le polveri ultrasottili passano nel sangue ove, probabilmente per un meccanismo di tipo ossidativo, partecipano attivamente ai processi aterosclerotici: deriva da ciò un incremento delle patologie cardiovascolari (infarto, trombosi, ecc.), evidenziato in via epidemiologica e sperimentale. Rileva, inoltre, a causa della distribuzione per via ematica, il potenziale interessamento di tutti gli organi: per questa via, infatti, sembrano particolarmente colpiti gli organi dotati di una fitta rete vascolare, quali fegato e milza, come è stato dimostrato nei lavoratori dell'industria del carbone, specie in quelli già affetti da patologie polmonari. Non sembra tuttavia che l'accumulo di particelle nel fegato e nella milza sia correlato con patologie specifiche, se si eccettua una possibile azione di tipo pro-coagulatorio a livello epatico.

L'assorbimento per via nasale sembra associarsi, invece, con un peculiare tropismo (forse per il tramite dei nervi cranici) con il tessuto encefalico: in particolare le piccole dimensioni del particolato renderebbero agevole il superamento della c.d. barriera emato-encefalica, con conseguente aumento delle neuropatie tossiche. È stato dimostrato sperimentalmente il passaggio al lobo olfattorio di nanoparticelle radioattive somministrate per inalazione a ratti. Non sarebbero tuttavia trascurabili le differenze tra i diversi tipi di polveri: essenziale sembrerebbe essere la composizione chimica del particolato e le relative proprietà tossicologiche legate non solo ai componenti strutturali (essenzialmente carbonio), ma anche alla presenza di inquinanti (temibili i metalli), seppure in tracce. Ratti esposti a fumi di saldatura hanno dimostrato chiara evidenza di malattie neurologiche causate dal manganese.

La penetrazione cutanea di NP è stata studiata sperimentalmente, ma con risultati controversi. Solo le particelle più piccole - ma una minima percentuale di esse - sembrano poter superare lo strato corneo, e ciò avviene soprattutto in sedi cutanee soggette a traumatismi. La coalescenza delle nanoparticelle per mezzo delle forze di Van der Waals tende a generare particolati del diametro di decine di millimicron. Nel caso dei nanotubi si possono generare particolati dalle dimensioni disomogenee tendenzialmente filamentosi (con un diametro nell'ordine di 20 nanometri ed una lunghezza che può arrivare al mm) o di forma piatta. Analogamente dicasi per i nanotubi metallici semiconduttori.

Esistono alcuni dati sperimentali (somministrazione intratracheale in ratti di *multi-wall nanotubes*) che hanno evidenziato risposte infiammatorie e reazioni fibrotiche polmonari simil-asbestosiche. Altri studi sperimentali hanno dimostrato la possibilità di passaggio di nanoparticelle nell'interstizio polmonare. Un aumento della permeabilità di epiteli ed endoteli dovuta ad altre cause può favorire la diffusione intrapolmonare delle nanoparticelle. La risposta infiammatoria del parenchima polmonare, misurata come quantità di neutrofili presenti nel liquido di lavaggio broncoalveolare, sembra essere correlata con l'area superficiale delle particelle inalate e, a parità di superficie, più accentuata per le particelle ultrafini. Particelle di biossido di titanio e di *carbon black* sono note cause di fibrosi e tumori in ratti. Del resto tutte le patologie infiammatorie croniche del polmone sembrano correlate con una maggiore incidenza di neoplasie e forse

¹⁵ Oberdorster G, Oberdorster E, Oberdorster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect.* 2005 Jul;113(7):823-39. Review.

l'unica conclusione lecita è ammettere che le conoscenze sugli effetti cronici e/o neoplastici polmonari delle nanoparticelle sono ancora troppo scarse.

Un cenno a parte meritano, infine, due ulteriori aspetti problematici del rischio nei processi di produzione. La quantità di energia utilizzata per portare i reagenti (generalmente grafite) allo stato di plasma e la necessità di utilizzare catalizzatori metallici (specialmente l'alluminio), nonché le dimensioni dei nanomateriali ottenuti, rendono particolarmente critici e di difficile gestione il rischio elettrico e quello di esplosioni. Poiché il campo di esplosività delle polveri è associato al rapporto massa-superficie delle particelle e alla loro concentrazione, è evidente che il rischio di esplosione (specialmente alto per le polveri metalliche) è sempre in agguato. L'utilizzo di tecnologie in atmosfera inerte hanno finora impedito incidenti di rilievo, ma è proprio la scarsa conoscenza del comportamento esplosivo di questi particolati allo stato ultrafino a farne un problema degno di attenzione e di approfondimento. Analoghe considerazioni si possono fare circa la validità di attrezzature e dispositivi di protezione nella manipolazione industriale dei nanomateriali. Per la protezione respiratoria sembra che le maschere facciali filtranti antipolvere di classe 3 (FFP3) possano offrire una sufficiente protezione, almeno per polveri con diametro superiore a 2 nanometri.

3. ULTERIORI PROFILI CRITICI DELLE NANOBIO TECNOLOGIE

Aspetti generali

Va tenuto presente che i problemi che prenderemo in esame in questo paragrafo, qualora si andasse oltre la fase di ricerca e sperimentazione strettamente controllata, riguardano mere ipotesi (o "Apocalyptic Nightmares")¹⁶, che per ora appaiono difficilmente verificabili anche a causa della scarsità di studi specifici e di informazioni ufficiali. Molti di questi profili critici sono propri o sono comuni a ogni innovazione tecnologica, ma, in questo caso, ci troviamo davanti a un settore dalle estese potenzialità scientifiche e sociali, tendenzialmente suscettibile di ridefinire le tradizionali barriere tra biologia, fisica e chimica, per cui sarebbe indispensabile, secondo alcuni¹⁷, l'elaborazione di una nuova etica che sia di supporto alla scienza del futuro, anticipando e prevenendo le conseguenze di determinate scelte. Il Senato degli USA, nell'approvare, il 18 November 2003, il *21st Century Nanotechnology Research and Development Act*, ha sottolineato i rischi di "self-replicating nanoscale machines or devices; the release of such machines in natural environments; encryption; the development of defensive technologies; the use of nanotechnology in the enhancement of human intelligence; and the use of nanotechnology in developing A.I. (Artificial Intelligence)". Analoghi dubbi sui possibili esiti negativi sono, con maggior cautela, avanzati e subito messi da parte dal documento intitolato *Social and Economic Challenges of Nanotechnology*, diffuso nel luglio 2003 dall'*UK Economic and Social Research Council*.

Per questi motivi, il C.N.B. ha ritenuto opportuno prendere in esame anche i profili etici di alcuni degli aspetti più incerti delle nanobiotecnologie con il solo intento, senza nessuna pretesa esaustiva e senza voler sollevare inutili allarmismi, di raccogliere l'invito del documento dell'*Economic and Social Research* al punto 27: "We need to have rational and mature public dialogue informed by good science. This will explore the acceptable uses of new technologies, and processes whereby the outcomes of dialogue help to shape the policies introduced by Government"¹⁸. In particolare saranno esaminati i

¹⁶ Così BERT GORDIJN, *From utopian dreams and apocalyptic nightmares towards a more balanced view*, in *Proceedings of the UNESCO World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology (COMEST) Third Session* (tenutasi a Rio de Janeiro dal 1o al 4 dicembre 2003), p. 115 e ss.

¹⁷ B. GORDIJN, *Nanoethics From Utopian Dreams and Apocalyptic Nightmares towards a more Balanced View*, in *Science and Engineering Ethics*, 2005, 11, pp. 521-533.

¹⁸ "Engagement of the scientific community in regular dialogue with the general public in order to discover likely public concerns early, and continuation of dialogue to address and alleviate public concerns by the presentation of clear facts" è anche la preoccupazione avanzata dall'*ESF Scientific*

seguenti profili: la combinazione tra molecole inorganiche ed organiche (problema della autoreplicazione); le ricadute economiche e sociali (nanopovertà); il controllo della persona e la tutela della privacy; le utilizzazioni militari o terroristiche; i riflessi sull'identità umana.

Un aspetto singolare: la combinazione tra molecole organiche e inorganiche

Appare opportuno soffermarsi sui problemi che le nanobiotecnologie potrebbero porre nella forma che viene definita "avanzata"¹⁹. In questo caso, le nanobiotecnologie non si limitano a fornire nuove opportunità tecnologiche per la produzione di materiali o di sostanze plastiche e chimiche (fullereni, nanotubi, nanoparticelle, nanocapsule, nanopori, punti quantici o *nano dots*, fili quantici o *nano wires*), ma combinano nanomateriali inorganici e molecole organiche, intervenendo nel metabolismo cellulare per condizionare la produzione di molecole o la trasmissione di informazioni oppure per creare nuove strutture cellulari o supporti per la costruzione di nuove molecole complesse o assemblatori di atomi per la creazione di nuovi assetti molecolari. Avremmo insomma l'intenzionale alterazione di organismi viventi attraverso la manipolazione del DNA per creare *moleculesize machines* (macchine molecolari), congegni che sintetizzano pezzo per pezzo una varietà di macromolecole, penetrando e integrandosi nelle cellule degli organismi viventi. Il già citato lavoro di Drexler chiama questi congegni biologici "assemblers" e li descrive come "macchine viventi" capaci di auto-riprodursi, ipotizzando che "with assemblers, we will be able to remake our world or destroy it"²⁰. Si tratta di mere supposizioni capaci di suggerire le avventure scientificamente opinabili del romanzo *Preda* di Chrichton, ma assolutamente avveniristiche in relazione agli attuali sviluppi della tecnologia. Avveniristiche, ma non infondate, perché la ricerca sta approfondendo proprio l'idea di realizzare nanomateriali, applicando il modello di fabbricazione "bottom up" delle strutture cellulari. Tra la "fabbricazione bottom up", per "self-assembly of DNA to sort carbon nanotubes", e l'auto-replicazione la differenza è molto sottile, ancorché non esclusivamente semantica.

"Nanopovertà"

Se effettivamente le nanotecnologie dovessero mantenere le promesse di aumentare la lunghezza e la qualità della vita, di migliorare le condizioni fisiche, di ridurre l'inquinamento e i costi dell'energia e delle materie prime, potrebbero diventare ancora più evidenti le differenze tra paesi ricchi e paesi in via di sviluppo. Già ora molti di questi paesi hanno un accesso estremamente limitato all'energia elettrica, all'informazione, all'istruzione, ai farmaci, l'introduzione tecnologie ancora più sofisticate e ancora più tra loro connesse corre il rischio di rendere le attuali diversità di sviluppo vere e proprie discriminazioni, una forma intollerabile di "povertà della povertà": la "nanopovertà". Esiste in proposito, come già per gli effetti economici delle biotecnologie, una profonda divergenza di vedute e non manca chi ritiene che solo le nanotecnologie potrebbero aiutare i paesi in via di sviluppo a superare alcune delle loro pressanti necessità, come sembrano dimostrare gli investimenti in questo settore da parte di India, Tailandia, Cile, Argentina, Messico²¹.

Biosorveglianza e privacy

Forward Look on Nanomedicine in "European Science Foundation Policy Briefing", February, 2005, n. 23, p. 5.

¹⁹ J. P. DUPUY, *Complexity and Uncertainty. A Prudential Approach To Nanotechnology* prepared for the March 1-2, 2004 meeting of the Directorate-General for Health and Consumer Protection of the European Commission, "Mapping Out Nano Risks".

²⁰ Cfr. K. E. DREXLER, *Engines of Creation. The Coming Era of Nanotechnology*, cit., p. 174.

²¹ In senso contrario F. SALAMANCA-BUENTELLO, D.L. PERSAD, E. B. COURT, D.K. MARTIN, A.S. DAAR et Al. *Nanotechnology and the developing world*, in *PloS Medicine*, April 2005, 2, p. 4

Si è già ricordato che uno degli impieghi più promettenti delle nanobiotecnologie in medicina riguarderebbe la possibilità di prevenire l'insorgere di malattie attraverso laboratori cibernetici miniaturizzati (*lab on a-chip technology*). Già s'impiegano nell'uomo, per ora solo sperimentalmente, nanosfere a scopo diagnostico. Si pensa anche che questi chip renderebbero più semplici e immediati i test genetici. Ognuno potrebbe tenere se stesso sotto un continuo e costante controllo medico. Nanoparticelle potrebbero essere utilizzate anche come supporto di rilascio di medicinali mirati ad annientare o riparare singole cellule. Materiali di dimensioni nanometriche possono costituire il substrato in cui virus o molecole di DNA possono essere incapsulate oppure ordinate. L'interazione di queste biomolecole con nanoparticelle, nanotubi o la superficie nanometrica possono servire per riconoscere proteine specifiche o virus, oltre a poter veicolare le molecole fino al bersaglio. Gli straordinari vantaggi di queste tecniche, nella prevenzione e nella cura mirata, lasciano ipotizzare la possibilità di eliminare, essenzialmente mediante la prevenzione, l'incidenza di malattie mortali, come il tumore, nell'arco della presente generazione.

C'è, però, da prendere in esame il problema complesso dell'enorme pressione psicologia che questo potenziale monitoraggio di se stessi potrebbe determinare. E' tollerabile l'idea di essere continuamente sotto osservazione? Come e da chi andrà gestita questa massa di notizie? Come inciderà sul rapporto tra salute e malattia? Come continuare a garantire la riservatezza dei dati sensibili? La stessa tecnologia con cui si immettono nell'organismo "DNA chips" per effettuare screening medici o per rilasciare farmaci consente di fabbricare nanosensori, nanocamere e nanomicrofoni. Un controllo telemetrico funzionale e mobile con sensori e congegni *in vivo* potrebbe servire tanto a scopo diagnostico quanto a scopo politico per arrivare ad un controllo integrale dell'intera popolazione senza che questa possa (neppure minimamente) rendersene conto²². Si fa notare che tutto ciò è già possibile senza far ricorso alle nanobiotecnologie. Esistono le c.d. *smart tags*, basate sulla tecnologia *RFID (Radio Frequency Identification)*, che sono attualmente impiegate per controllare gli accessi nelle biglietterie o nei trasporti. Si tratta di oggetti molto più piccoli di un decimo di millimetro e quindi assolutamente invisibili. Non vi è nessuna difficoltà tecnologica nel ridurre ancora le dimensioni e nell'ampliarne le funzioni per controllare, integralmente e inavvertitamente, ogni aspetto della vita privata. Le nanotecnologie potrebbero aumentare questo rischio, perché sarebbe estremamente difficile impedire che lo stesso nanochip che serve al rilascio di un farmaco sia anche programmato per altre funzioni. Si tratta di scenari avveniristici, ma tecnologicamente possibili.

C'è chi si spinge ancora oltre e ipotizza l'ideazione di nanochip in grado di condizionare a distanza il sistema nervoso. Lo stesso meccanismo che consente di superare le barriere cerebrali per interagire con specifiche molecole o per il rilascio di un farmaco potrebbe essere utilizzato, magari attraverso l'autorizzazione di un giudice, per reprimere certi impulsi violenti o per controllare certe forme di perversione sessuale. Su questo problema ancora Crichton aveva scritto, molto tempo fa e senza ancora pensare alle nanobiotecnologie, un altro romanzo, *Il terminale uomo (The Terminal Man)* in cui ipotizzava l'utilizzazione di un sistema di elettrodi per controllare a distanza le crisi di violenza omicida scatenate da una strana forma di epilessia. Nell'*Introduzione* Crichton riportava le affermazioni di James V. McConnell dell'Università di Michigan: "Sentite, noi queste cose possiamo farle. Possiamo controllare, il comportamento. Ma chi dovrà decidere ciò che bisogna fare? Se non vi sbrigate a farlo e a dirmi cosa dovrei fare, lo deciderò io anche per conto vostro. E allora sarà troppo tardi"²³. Non dobbiamo trasformare le ipotesi romanzesche in problemi bioetici, tuttavia non si può neppure ignorare che il problema del controllo e dell'eventuale condizionamento a distanza diventa estremamente attuale sia per effetto delle misure di identificazione e accertamento, sempre più invasive e sempre più sofisticate, della biometria e sia per effetto dell'estrema miniaturizzazione dei possibili strumenti di monitoraggio. Se il

²² A. GRUNWALD, *Nanotechnology - A New Field of Ethical Inquiry?* in *Science and Engineering Ethics*, 2005, 11, pp. 187-201.

²³ Tr.it. Milano, Garzanti, 1972, p. 11.

braccialetto elettronico è ritenuto uno strumento legittimo per controllare i soggetti in libertà vigilata, cosa impedirebbe di utilizzare le ben più raffinate e sicure nanotecnologie? Se viene invocata la castrazione chimica per impedire il compimento di determinati reati sessuali, perché non pretendere, se la tecnologia fosse disponibile, l'inibizione attraverso nano-chip di qualsiasi comportamento violento? Anche se si tratta mere ipotesi, se non di suggestioni romanzesche, appare indifferibile una riflessione sui limiti etici della biosorveglianza, sui rapporti tra libertà e sicurezza: quando il controllo diventa condizionamento e quando il condizionamento è violazione dell'integrità personale?

Usi terroristici e militari

Viene fatto osservare che un nano-chip capace di operare dentro un corpo umano può essere programmato più facilmente per distruggere che per guarire. La capacità di interferire con il metabolismo cellulare aprirebbe alla guerra batteriologica o al terrorismo, enormi possibilità distruttive. Se poi queste nanomacchine potessero autoreplicarsi si avrebbe uno strumento ancora più pericoloso della bomba atomica, ma più preciso, meno costoso, più semplice da fabbricare, da usare e più difficile da individuare. Le misure ridottissime renderebbero estremamente semplice il trasporto e il rilascio nell'ambiente. In questo caso i rischi sarebbero aggravati dal fatto che le nanoparticelle possono tendenzialmente autoriprodursi e possono superare facilmente sia la barriera dell'epidermide che quella emato-cerebrale. La capacità d'interazione delle nano-particelle con le strutture sub-cellulari non è molto conosciuta e la comunità scientifica è tutt'altro che unanime nell'escluderne i pericoli potenziali²⁴. D'altra parte se è possibile ipotizzare il rafforzamento delle barriere immunitarie (*mosquito nets*) per ridurre l'incidenza delle malattie infettive, è altrettanto possibile ipotizzare l'elaborazione di sistemi opposti che inibiscono le difese immunitarie. I meccanismi bio-tecnologici delle due operazioni sono gli stessi. In astratto, i terroristi potrebbero procurarsi facilmente forme relativamente innocue di tossine o di sostanze chimiche e con una minima manipolazione renderle strumenti mortali, attraverso la possibilità di farle interagire con l'organismo, alterando i processi metabolici. Si tratta di una tecnologia semplice, molto più semplice di quella necessaria per produrre le tradizionali armi chimiche o batteriologiche. Per esempio, è teoricamente possibile, attraverso una nano-macchina, fabbricare in grande quantità, molecola per molecola, la tossina dell'antrace senza aver accesso al *Bacillus anthracis*²⁵. La stessa tecnologia potrebbe essere utilizzata per attaccare sistemi meccanici o elettronici, bloccando centrali nucleari, centrali elettriche, aeroporti, sistemi di informazione. Le nanoparticelle auto-replicanti potrebbero agire con lo stesso sistema di funzionamento del virus di un computer: attivarsi automaticamente e diffondersi fino a distruggere gli elementi basilari per il funzionamento. Quali misure adottare di fronte a questi pericoli? Il problema non è, certo, quello di bloccare la ricerca, ma di assumere la consapevolezza della profonda ambivalenza di certi sviluppi²⁶, alimentando l'informazione e la discussione pubblica. Minimizzare i rischi e accentuare i vantaggi potrebbe, nel breve periodo, avere un effetto rassicurante, ma finirebbe, alla lunga, per creare un vuoto di conoscenza e quindi di democrazia. Nelle scelte etiche non è sempre possibile garantire il bene per tutti, ma è certamente importate che tutti partecipino ai processi decisionali.

Identità umana

Si afferma che le nanotecnologie, in combinazione con la biotecnologia, l'elettronica e la medicina potranno consentire di intervenire radicalmente sul corpo

²⁴ C. ZANDONELLA, *The Tiny Toolkit*, in *Nature*, 423, 1 maggio 2003, p. 11.

²⁵ J. ROTHSTEIN WOLFSON, *Social and Ethical Issues in Nanotechnology: Lessons from Biotechnology and Other High Technologies*, in *Biotechnology Law Report*, 376- 22, Number 4 (August 2003), p. 381.

²⁶ K. GEISER, *Nanotechnology and Environmental and Public Health Considerations*, in "New Solutions", Vol 14(1), 2004, p. 8-18.

umano per ripararlo o per potenziarne le capacità. E' possibile pensare alla costruzione di organi o di tessuti per il trapianto ma anche alla riparazione di funzioni sensoriali compromesse o al loro ampliamento, allargando ad esempio lo spettro elettromagnetico della percezione visiva. Sono già alla studio le connessioni tra elettronica e sistema nervoso, attraverso *nanoelectronic neuro-implants (neurobionics)*, che consentirebbero di correggere difetti della vista o dell'udito. Se fosse possibile collegare l'attività cerebrale a sistemi di elaborazioni dei dati si aprirebbe lo scenario, tanto suggestivo quanto avveniristico, dell'*uploading*: estrarre le informazioni contenute in un cervello umano e replicarle in un calcolatore. Nanomacchine specializzate dovrebbero passare allo scanner, atomo per atomo, il tessuto cerebrale. Poi l'informazione dovrebbe essere digitalizzata e implementata attraverso appositi software che permettano di conservarla o di trasferirla. Guardando questo stesso problema, dalla parte non più dell'uomo ma delle macchine, sono da tempo avviati i tentativi di costruire "computer organici" che utilizzano "flash memory chips" integrati con strutture cellulari oppure transistor assemblati con nano-tubi di carbonio e frammenti di DNA. La costruzione di questi ibridi biologici, dalle nanomacchine ai *labs on a chip* e fino ai computer a base organica, altera profondamente la distinzione tra biologia, chimica e fisica, ma anche quella tra materiale e immateriale, tra materiale e congegno. Oltre che di una nano-etica si è parlato anche di una nano-filosofia, per sottolineare l'esigenza di ripensare tutte le categorie concettuali dell'identità umana "bottom up", a partire dall'idea che non esista l'uomo, ma la nano-particella, con tutti i suoi possibili assemblaggi. Anche senza spingersi tanto oltre, affrontando il problema, puramente ipotetico, di come qualificare, eticamente e giuridicamente, il contenuto del cervello scannerizzato e conservato in un nano-chip, è facile intuire quali profondi cambiamenti potrà subire la nozione di identità umana e di integrità personale²⁷. Ad esempio, il potenziamento delle capacità neurologiche, mnemoniche o visive potrà essere consentito indiscriminatamente? Chi sarà a decidere i limiti e le possibilità di utilizzazione? Il dominio tecnologico consentirà di "produrre" esseri biologicamente superiori, alimentando nuove forme di razzismo?

4. L'ADEGUATEZZA DELLE METODOLOGIE ESISTENTI PER LA VALUTAZIONE DEI RISCHI ASSOCIATI AI PRODOTTI DELLE NANOTECNOLOGIE

Numerosi documenti, negli ultimi anni, hanno tentato di individuare e descrivere i rischi potenziali collegati o conseguenti allo sviluppo delle applicazioni nanotecnologiche²⁸. Nel 2005 la Commissione europea ha posto le basi per

²⁷ R. W. BERNE, *Towards the Conscientious Development of Ethical Nanotechnology*, in *Science and Engineering Ethics*, 2004, 10, pp. 627-638.

²⁸ Cfr. in proposito, oltre al rapporto *The Social and Economic Challenges of Nanotechnology* approvato nel luglio 2003 dall'Economic and Social Research Council britannico, che ha avviato il dibattito pubblico in argomento, i risultati del workshop organizzato a Bruxelles dalla Commissione europea nel marzo 2004 (cfr. *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis*); il documento *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, adottato il 29 luglio 2004 dalla The Royal Society e dalla The Royal Academy of Engineering britanniche, in <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm> (che, pur escludendo l'esistenza di validi motivi di preoccupazione circa i rischi potenziali delle applicazioni nanotecnologiche, aveva sottolineato la necessità di approfondire la ricerca in materia e raccomandava di applicare ai materiali nanostutturati le stesse cautele imposte a livello normativo per i nuovi prodotti chimici); il documento elaborato nell'ottobre 2004 dall'Health and Safety Executive del governo inglese (in <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr274.htm>); il rapporto *Down on the Farm* predisposto dall'Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC Group) nel novembre 2004; e la relazione intitolata *Characterising the potential risks posed by engineered nanoparticles*, adottata nel dicembre 2005 dal Department for Environment, Food and Rural Affairs britannico. Quest'ultimo documento individua tre aree principali in cui occorre approfondire la ricerca al fine di creare un quadro di gestione efficace dei rischi potenziali collegati o conseguenti alla diffusione delle nanoparticelle: a) caratterizzazione, definizione e misurazione delle nanoparticelle; b) valutazione dell'impatto delle nanoparticelle sugli esseri umani e sull'ambiente; e c) comprensione

l'approfondimento ulteriore degli studi condotti in quest'ambito, chiedendo agli esperti indipendenti dello Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) di elaborare un parere scientifico sull'adeguatezza delle metodologie esistenti per la valutazione dei rischi potenziali associati ai prodotti ingegnerizzati o derivati in via incidentale dalle nanotecnologie²⁹. Tale parere, che al momento costituisce lo studio più completo sull'argomento e di cui si dà conto nel presente paragrafo, è stato elaborato sulla base di alcuni atti che la Comunità europea ha adottato in ragione della crescente importanza assunta dalle nanotecnologie nel contesto della ricerca industriale e dell'economia europee, quali le conclusioni del Consiglio dell'Unione europea sulla strategia europea per le nanotecnologie³⁰, che sottolinea l'importanza della «analisi dei rischi potenziali durante tutto il ciclo vitale dei prodotti realizzati a partire dalle nanotecnologie», ed il Piano d'azione comunitario sulle nanotecnologie³¹. Tali documenti saranno esaminati nel paragrafo successivo.

Il parere dello SCENIHR descrive anzitutto le proprietà dei nanomateriali, per poi identificare le fonti delle nanoparticelle ed esaminare l'idoneità delle procedure esistenti per il rilevamento e la misurazione di tali strutture. Il parere affronta, inoltre, i profili tossicologici ed ecotossicologici delle nanoparticelle e i potenziali scenari conseguenti all'eventuale esposizione alle stesse, allo scopo di definire, da una parte, i metodi più efficaci per la misurazione di tale esposizione, per l'identificazione e la caratterizzazione del rischio ad essa collegato e per la valutazione integrata di detti elementi; e, dall'altra, di apprezzare compiutamente le possibili interazioni tra le nanoparticelle ed i sistemi viventi. Il parere, infine, individua le più significative lacune nelle conoscenze scientifiche necessarie ai fini della corretta valutazione dei rischi associati alle nanotecnologie e definisce i profili normativi rilevanti in materia.

Per apprezzare compiutamente i potenziali effetti negativi per la salute umana e per l'ambiente derivanti dalle nanotecnologie, lo SCENIHR propone anzitutto la distinzione tra due tipologie di nanostrutture: quelle in cui la struttura stessa è una particella libera e quelle in cui la nanostruttura costituisce parte integrante di un oggetto più grande. Le nanoparticelle possono essere generate naturalmente, o essere il prodotto accidentale di un processo industriale, ovvero possono essere specificamente create per sviluppare applicazioni basate sulle loro particolari proprietà³².

Il primo problema che si incontra nella valutazione dei rischi per gli esseri umani e per l'ambiente derivanti dalla diffusione delle nanoparticelle è costituita dalla difficoltà di effettuare il rilevamento e la misurazione di strutture e materiali che si collocano al di sotto della soglia del "visibile a occhio nudo". Con riferimento al settore considerato, infatti, lo SCENIHR ritiene insufficiente l'utilizzo del criterio della concentrazione di massa e propone di integrare tale criterio con altri più idonei (quali il numero di concentrazione e l'area di superficie), che attualmente non sono presi in considerazione dalle normative applicabili. Inoltre, secondo il parere in esame, i metodi esistenti per l'analisi dell'impatto ambientale delle nanoparticelle non sarebbero adeguati per determinare la distribuzione e la persistenza delle nanoparticelle nei diversi sistemi ambientali. Deriva da ciò, secondo il gruppo di esperti della Commissione, l'esigenza di modificare opportunamente gli attuali metodi di valutazione dell'esposizione e, in

della provenienza delle nanoparticelle e di come esse si muovono nell'ambiente, anche attraverso il corpo umano.

²⁹In http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/committees/04_scenihr/04_scenihr_en.htm

³⁰ Cfr. la comunicazione della Commissione Verso una strategia europea a favore delle nanotecnologie [documento COM(2004) 338 def. del 12 maggio 2004], approvata dal Consiglio dell'Unione europea il 24 settembre 2005.

³¹ Cfr. il documento Nanoscienze e nanotecnologie: Un piano d'azione per l'Europa 2005-2009 [documento COM(2005) 243 def. del 7 giugno 2005].

³² Tali proprietà saranno influenzate primariamente dalla superficie (in rapporto al volume) delle nanoparticelle e dagli effetti quantistici che si verificano a livello nanometrico. Una attenta individuazione delle proprietà fisico-chimiche è essenziale al fine di rendere disponibili nella *routine* metodi adeguati di valutazione del rischio.

particolare, di sviluppare metodologie e strumenti che consentano la misurazione di *routine* dell'esposizione rappresentativa alle nanoparticelle.

Passando ad esaminare i profili tossicologici ed ecotossicologici delle nanoparticelle, lo SCENIHR rileva anzitutto che solo alcuni test convenzionali di tossicità ed ecotossicità si sono rivelati utili nella valutazione dei rischi associati alle nanoparticelle, anche tenendo conto del fatto che, allo stato attuale, non sono disponibili dati scientifici in grado di identificare regole sistematiche sulle proprietà tossicologiche ed ecotossicologiche dei prodotti delle nanotecnologie. Esistono, infatti, pochi studi sul comportamento biologico delle nanoparticelle e sulla loro accumulazione nel metabolismo umano, nonché sulla loro specifica tossicità. Il maggior numero dei dati scientifici disponibili sulle risposte fisiologiche alle nanoparticelle riguardano il sistema respiratorio, in merito al quale i dati sperimentali dimostrano che, alla medesima concentrazione di massa, le nanoparticelle producono effetti tossici maggiori rispetto a particelle più grandi di una stessa sostanza. Inoltre, secondo i dati evocati, l'interazione delle nanoparticelle con biomolecole quali il DNA, l'RNA o le proteine cresce con il decrescere della dimensione delle particelle considerate. Da ciò deriva, secondo lo SCENIHR, che la valutazione del rischio tossicologico ed ecotossicologico dovrebbe essere effettuata caso per caso, con specifico riferimento alla capacità delle nanoparticelle di influire su preesistenti quadri clinici o sull'aumento della predisposizione a determinate malattie. Corollario di quanto affermato è la necessità di fondare i metodi di valutazione dei rischi tossicologici ed ecotossicologici associati alla diffusione ed alla distribuzione delle nanoparticelle su profili diversi dal "materiale equivalente": la corretta valutazione dei rischi potenzialmente derivanti dai prodotti delle nanotecnologie richiede quindi lo sviluppo di nuove strategie di indagine che tengano conto, anche *in itinere*, degli utilizzi previsti dei prodotti considerati e degli scenari di esposizione potenziale, sia umani che ambientali.

Per quanto riguarda le possibili interazioni tra le nanoparticelle ed i sistemi viventi, il parere dello SCENIHR rileva anzitutto che, se le nanoparticelle interagiscono con i sistemi viventi in ragione delle loro dimensioni e proprietà, non può tuttavia escludersi che anche strutture più grandi (ad esempio i caratteri nanotopografici dei dispositivi medici) possano generare rischi specifici per la salute umana e per l'ambiente. Nella considerazione dei rischi specifici derivanti dalle nanoparticelle, pertanto, vengono in rilievo non solo la dimensione, ma anche la forma e la composizione, oltre che la carica di superficie assorbita; ugualmente significativi sono i fenomeni di modifica, aggregazione, dissoluzione o degradazione della superficie delle nanoparticelle, da cui può derivare il rilascio di nanoparticelle. Posto che le nanoparticelle immediatamente solubili in ambiente fisiologico perdono le loro specifiche proprietà, è significativo verificare se esse si dissolvono o meno in molecole nocive. Riguardo alle nanoparticelle essenzialmente insolubili, esiste una possibilità di biopersistenza, derivante dall'esposizione di lungo termine e da specifici effetti associati alle nanoparticelle. Inoltre, la translocazione delle nanoparticelle può avvenire ad un livello più esteso e in siti diversi rispetto a quanto si verifica con particelle di dimensioni maggiori: pertanto si potrebbe verificare una distribuzione ed una accumulazione sistemica di tali particelle. È stato provato che le nanoparticelle sono in grado di translocare dal loro punto di accesso nel corpo umano e raggiungere altre parti, compreso il sangue e il cervello, anche se la portata e il significato di tale translocazione non sono chiari e pochi studi sono stati condotti in proposito. In particolare, è incerto se le nanoparticelle siano in grado di raggiungere il feto, anche se la distribuzione sistemica appare probabile nelle applicazioni mediche che comportano la somministrazione parenterale di nanoparticelle.

Allo stato attuale della ricerca, la prova della tossicità per l'uomo dell'esposizione sistemica alle nanoparticelle prodotte intenzionalmente è minima: tuttavia, rileva lo SCENIHR, le attuali linee guida sulla sperimentazione per l'identificazione e la caratterizzazione del rischio delle sostanze e dei prodotti chimici non richiedono ancora l'identificazione della distribuzione sistemica delle nanoparticelle, nonostante l'esistenza

di alcuni metodi potenzialmente idonei³³. Discorso diverso per le nanoparticelle di origine naturale e quelle generate non intenzionalmente dall'attività umana, che comportano un rischio di esposizione che si estende potenzialmente all'intero corso della vita degli individui interessati. Principale forma di contatto con l'uomo è l'inalazione, ma il crescente impiego di nanoparticelle in prodotti di largo consumo (quali cosmetici, preparati farmaceutici ed alimenti) comporta che le superfici di esposizione dermiche, gastrointestinali e parenterali vanno acquistando un'importanza crescente. Con riguardo all'ambiente, il rilascio e la propagazione di nanoparticelle può invece avvenire mediante l'aria, l'acqua e il suolo, con la conseguenza che diverse specie viventi possono essere interessate dall'esposizione: si rende ancora più urgente, pertanto, la necessità di ottenere dati sull'esposizione umana (con specifico riferimento ai lavoratori e consumatori) e delle altre specie, compresi i micro-organismi.

In conclusione, il parere dello SCENIHR rileva che, allo stato attuale della ricerca, non sono disponibili dati sufficienti in grado di identificare regole sistematiche per la valutazione dei rischi tossicologici ed ecotossicologici dei prodotti delle nanotecnologie. Infatti, se i metodi tossicologici ed ecotossicologici esistenti permettono di valutare la maggior parte dei rischi in parola, è però vero che l'incertezza scientifica circa la gravità e la portata dei possibili effetti negativi derivanti dalla diffusione delle nanoparticelle dovrebbero condurre all'elaborazione di nuovi metodi o alla modifica di quelli oggi disponibili. In ogni caso, sia che i metodi di valutazione esistenti necessitino di essere adattati, sia che i nuovi metodi di analisi, ove disponibili, non abbiano raggiunto un consenso di tipo normativo, lo SCENIHR evidenzia la necessità di: valutare i rischi caso per caso; porre in essere metodi adeguati per la definizione delle proprietà fisico-chimiche delle nanoparticelle; sviluppare metodi e strumenti che consentano di effettuare le misurazioni di *routine* dell'esposizione rappresentativa alle nanoparticelle; modificare i test di tossicità ed ecotossicità ed introdurre nuovi test volti ad ottimizzare il processo di valutazione del rischio; mettere a punto idonee metodologie per la valutazione della distribuzione sistemica delle nanoparticelle. In particolare, i nuovi metodi di valutazione auspicati dovrebbero fornire informazioni riguardo a come le nanoparticelle si distribuiscono nei tessuti umani e nei compartimenti ambientali.

Agli scopi indicati, lo SCENIHR ribadisce l'esigenza di colmare le lacune delle conoscenze scientifiche relative, tra l'altro, alle caratteristiche delle nanoparticelle ed al rilevamento dell'impatto e della persistenza di tali strutture sull'uomo e sull'ambiente, con specifico riferimento ai rischi di natura tossicologica. Nonostante il numero crescente di pubblicazioni scientifiche in materia di nanoscienze e nanotecnologie, infatti, permane un significativo *gap* nelle conoscenze dei dati relativi, in particolare, alla caratterizzazione dei meccanismi ed alla cinetica del rilascio di nanoparticelle a partire da un ampio *range* di processi e prodotti delle nanotecnologie; agli attuali livelli di esposizione alle nanoparticelle sia umani che ambientali; alla possibilità di estrapolare dati tossicologici relativi a nanoparticelle di diverse dimensioni e forme; allo studio dei livelli di esposizione alle nanoparticelle mediante l'analisi della risposta di "organi *target*"; ai livelli di esposizione ed agli effetti sulla salute dei lavoratori impiegati nella fabbricazione e nel trattamento delle nanoparticelle³⁴. Specifica importanza assumono, in questa prospettiva, le questioni relative al trasporto di nanoparticelle nel corpo umano ed i meccanismi di interazione a livello sub-cellulare e molecolare. Pertanto, il monitoraggio dell'esposizione occupazionale e i dati epidemiologici relativi al potenziale impatto delle nanoparticelle sulla salute umana costituiranno una priorità della ricerca futura e solleciteranno implicazioni normative e di gestione del rischio, ad esempio nella elaborazione di idonee linee-guida per i test tossicologici, nella definizione di *standard* di

³³ Secondo lo SCENIHR, un meccanismo di tossicità per alcune nanoparticelle consiste nella immissione di un tipo di ossigeno reattivo e nel conseguente processo di ossidazione delle cellule considerate.

³⁴ Le lacune cognitive comprendono la caratterizzazione, il rilevamento e la misurazione delle nanoparticelle; la dose di risposta, l'impatto e la persistenza delle nanoparticelle nel corpo umano e nell'ambiente; e tutti gli aspetti relativi alla tossicologia ed ecotossicologia delle nanoparticelle.

qualità occupazionali ed ambientali e nella revisione della disciplina giuridica di classificazione ed etichettatura dei prodotti industriali.

5. ORIENTAMENTI DI POLITICA NORMATIVA

Occorre anzitutto rilevare, sul piano generale ed introduttivo, l'assenza di norme di diritto internazionale e di diritto comunitario che disciplinino espressamente le applicazioni nanotecnologiche, anche se esistono principi generali che possono trovare utile applicazione anche nella materia considerata, quali, ad esempio, il principio di prevenzione, di previa valutazione dell'impatto ambientale e il principio di precauzione. Esiste inoltre, sul piano del diritto internazionale, una fonte pattizia, il Protocollo di Cartagena sulla biosicurezza (firmato a Montreal il 29 gennaio 2000), addizionale alla Convenzione sulla diversità biologica (Rio de Janeiro, 5 giugno 1992), che presenta un certo rilievo ai fini dell'indagine.

Il principio di precauzione, nella formulazione accolta dai trattati multilaterali sulla protezione dell'ambiente, presuppone, come è noto, una sorta di inversione dell'onere probatorio, ponendo a carico di chi intenda svolgere una certa attività rischiosa (e non a carico delle vittime potenziali) l'onere di dimostrare che quella attività non crea una minaccia di un danno "grave e irreversibile" per l'ambiente e l'*habitat* umano, nonché l'onere di adottare le misure idonee a fugare i rischi potenziali collegati o conseguenti all'attività considerata. Così inteso, il principio di precauzione potrebbe essere invocato (anche negli ordinamenti nazionali) qualora si prevedesse la diffusione nell'ambiente di nanoparticelle ed altri materiali nanostrutturati, che mostrassero la tendenza a bioaccumularsi negli organismi e nella catena alimentare. E' vero, tuttavia, che ogni discussione in proposito si colloca ancora in uno stadio embrionale: nel documento *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, adottato dalla The Royal Society e dalla The Royal Academy of Engineering il 29 luglio 2004, vengono confutati i dati scientifici che giustificerebbero la richiesta di moratoria del rilascio di nanoparticelle nell'ambiente formulata da alcune associazioni ambientaliste (ETC Group e Greenpeace)³⁵, ma al contempo si invitano i governi, in linea con il principio di precauzione, ad adottare misure normative adeguate al rischio che le nanoparticelle potrebbero presentare sotto il profilo tossicologico ed ecotossicologico³⁶.

Il Protocollo di Cartagena è volto, «conformemente all'approccio precauzionale sancito dal Principio 15 della Dichiarazione di Rio», a «contribuire ad assicurare un livello adeguato di protezione per il trasferimento, la manipolazione e l'utilizzazione sicura di organismi viventi modificati risultanti dalla biotecnologia moderna che possono avere effetti negativi sulla conservazione e l'uso sostenibile della diversità biologica, anche in considerazione dei rischi per la salute umana, con particolare attenzione ai movimenti transfrontalieri» (cfr. l'art. 1). A tal fine, il Protocollo disciplina i movimenti transfrontalieri di organismi viventi modificati prevedendo il ricorso a procedure di valutazione dei rischi volte ad assicurare, da una parte, la conservazione e l'uso sostenibile della diversità biologica e, dall'altra, la tutela della salute umana. E' evidente che, per cogliere il grado di utile applicazione alle nanotecnologie della disciplina introdotta dal Protocollo occorre apprezzare correttamente il significato delle definizioni utilizzate dallo strumento pattizio, e in particolare quelle di «living modified organism»³⁷

³⁵ La richiesta di moratoria è stata formulata nel corso del summit di Johannesburg sullo sviluppo sostenibile, tenutosi dal 26 agosto al 4 settembre 2002. Sulle reazioni suscitate da tale proposta, che nelle intenzioni dell'ETC Group avrebbe dovuto riguardare sia la ricerca che le applicazioni in campo nanotecnologico, si tornerà nel § 6.

³⁶ Cit., p. 77.

³⁷ E cioè gli «organismi viventi caratterizzati da una nuova combinazione di materiale genetico ottenuta mediante la moderna biotecnologia», ove per «organismi viventi» deve intendersi ogni «entità biologica capace di trasmettere o replicare materiale genetico, compresi gli organismi sterili, i virus e i viroidi» (cfr. l'art. 3, lett. g e lett. h).

e di «modern biotechnology»³⁸: comunque, al di là di una valutazione di merito, è evidente che il Protocollo di Cartagena tocca solo incidentalmente le questioni poste dalle nanobiotecnologie e non dedica ad esse alcuna considerazione specifica³⁹.

Più mirati sono invece gli orientamenti politici e normativi assunti dall'Unione europea, che ben si prestano ad individuare i principali problemi giuridici suscitati dalle nanotecnologie non solo sul piano della tutela della salute e dell'ambiente: accanto ai profili richiamati, infatti, i documenti comunitari fanno emergere aspetti peculiari, riguardanti la protezione della riservatezza, la tutela dei diritti di proprietà intellettuale o, più in generale, la cooperazione internazionale in questo settore⁴⁰.

Un certo *favor* dell'Unione europea nei riguardi delle nanotecnologie è enunciato fin dal titolo del primo documento ad esse dedicato, la comunicazione *Verso una strategia europea a favore delle nanotecnologie*, adottata dalla Commissione il 12 maggio 2004. Tale comunicazione, in sintesi, individua quale obiettivo prioritario della politica comunitaria nel settore considerato il rafforzamento del "primato" competitivo acquisito in questa materia dall'Europa e propone, a tal fine, una strategia integrata e responsabile, in grado di coniugare gli aspetti legati allo sviluppo industriale a quelli più direttamente connessi alle esigenze di sicurezza, ambientali e sanitarie, sopra ricordate⁴¹. Dopo avere auspicato che il patrimonio di conoscenze acquisite dall'Unione europea nel campo delle nanoscienze sia messo pienamente a frutto mediante la realizzazione di idonee infrastrutture di ricerca e lo stanziamento di adeguati livelli di investimenti (pubblici e privati), essenzialmente allo scopo di permettere lo sviluppo di prodotti e processi sostenibili sotto il profilo commerciale, la comunicazione della Commissione sottolinea come, a fronte dell'ormai rapida evoluzione delle nanotecnologie, sia indispensabile individuare e risolvere fin dalle fasi più precoci i problemi della sicurezza, reali o percepiti come tali, alimentando al contempo un dialogo con il pubblico incentrato sulla fiducia. In tale prospettiva, appare altresì necessario alla Commissione elaborare un nuovo approccio per la valutazione e la gestione dei rischi, che permetta l'adattamento delle consolidate e tradizionali procedure utilizzate allo scopo⁴².

³⁸ E cioè, «l'applicazione di tecniche *in vitro* dell'acido nucleico, compresa la ricombinazione dell'acido deossiribonucleico (DNA) e l'inoculazione diretta dell'acido nucleico in cellule e organuli»; ovvero «la fusione di cellule al di fuori della famiglia tassonomica, che superino le naturali barriere fisiologiche della riproduzione o della ricombinazione e che sono diverse dalle tecniche tradizionali utilizzate nell'allevamento e nella selezioni» (cfr. l'art. 3, lett. i).

³⁹ E' significativo rilevare che la nozione di LMO accolta dal Protocollo di Cartagena coincide solo parzialmente con quella elaborata in ambito comunitario. L'art. 2, n. 2, della direttiva n. 2001/18, infatti, definisce quale OGM «un organismo, diverso da un essere umano, il cui materiale genetico è stato modificato in modo diverso da quanto avviene in natura con l'accoppiamento e/o la ricombinazione genetica naturale» (intendendosi per «organismo» qualsiasi entità biologica capace di riprodursi o di trasferire materiale genetico: cfr. l'art. 2, n. 1, della direttiva). Appare quindi evidente, da una parte, l'esplicita esclusione dell'essere umano dal campo di applicazione della disciplina comunitaria, e dall'altra, l'esplicito riferimento all'uso della moderna biotecnologia operato dal Protocollo. Anche le tecniche di modificazione genetica rilevanti ai fini del Protocollo non trovano esatta corrispondenza in quelle rilevanti ai fini della direttiva n. 2001/18, la quale esclude dal proprio ambito di applicazione le tecniche di modificazione genetica «convenzionali» elencate negli allegati IA, parte 2, e IB. Il Protocollo, infine, include nella nozione di «organismi viventi» ogni «entità biologica capace di trasmettere o replicare materiale genetico, compresi gli organismi sterili, i virus e i viroidi», che risulta quindi in grado di disciplinare l'immissione in commercio anche di quegli LMO contenenti il gene della sterilità (ad esempio, le c.d. sementi *terminator*, sopra ricordate), che invece restano esclusi dall'ambito di applicazione della direttiva comunitaria.

⁴⁰ Ancora, si pensi ai problemi, segnalati al § 3, relativi all'equo accesso, a costi accettabili, alle nanotecnologie ed allo squilibrio tra regioni e tra individui nella preparazione e nella capacità di fruire delle innovazioni tecnologiche apportate dalle nanotecnologie, che potrebbe provocare, nel medio periodo, un vero e proprio "nanodivide".

⁴¹ Cfr. il documento COM(2004) 338 def. del 12 maggio 2004, anche in *Guce* n. C222 del 4 settembre 2004, p. 7.

⁴² Per le iniziative proposte al riguardo, si veda più avanti il Piano di azione comunitaria del 2005. Per quanto riguarda invece le linee di azione (o "dinamiche") volte a stimolare il progresso delle

I contenuti sostanziali della comunicazione della Commissione, che ha formato oggetto di un'ampia consultazione pubblica⁴³, sono stati accolti favorevolmente dal Consiglio dell'Unione europea, riunitosi il 24 settembre 2004, e hanno incontrato anche il sostegno del Comitato economico e sociale, che si è pronunciato al riguardo il 10 novembre 2004. Alla luce di tali riscontri, la Commissione ha adottato, nel giugno 2005, un Piano d'azione specifico in materia di nanotecnologie, intitolato *Nanoscienze e nanotecnologie: Un piano d'azione per l'Europa 2005-2009*, che definisce una serie di interventi articolati ed interconnessi volti a fornire attuazione agli obiettivi prioritari individuati dalla comunicazione⁴⁴. Infatti, il Piano d'azione in parola, dopo aver sottolineato i progressi compiuti dalle nanoscienze in un'ampia gamma di settori ed avere evidenziato l'esigenza che i rischi per la salute, la sicurezza e l'ambiente connessi allo sviluppo delle nanotecnologie siano affrontati direttamente e in maniera precoce, analizza le priorità della strategia proposta, mettendo in evidenza gli interventi auspicabili⁴⁵.

In particolare, il Piano d'azione esprime la volontà della Commissione di potenziare gli stanziamenti di bilancio in favore delle nanotecnologie nell'ambito del futuro VII Programma quadro di ricerca, sviluppo tecnologico e dimostrazione, relativo al periodo 2007-2013⁴⁶, rafforzando l'attività di ricerca interdisciplinare lungo l'intero ciclo di creazione, trasferimento e utilizzo delle conoscenze, e proponendo un sostegno specifico per il settore della nanoelettronica. Inoltre, la Commissione intende rafforzare il sostegno fornito all'attività di ricerca concernente il potenziale impatto delle nanotecnologie sulla salute umana e l'ambiente (con specifico riferimento alle nanoparticelle ed ai c.d.

nanotecnologie, la comunicazione del 2004 pone l'accento sul rafforzamento degli investimenti, il coordinamento delle attività di ricerca e sviluppo tecnologico per potenziare l'eccellenza scientifica, l'interdisciplinarietà e la concorrenza nel settore, nonché la valorizzazione industriale; sullo sviluppo di un'infrastruttura di ricerca di alto livello e competitività; sulla promozione dell'istruzione e della formazione interdisciplinari del personale impegnato nella ricerca, nonché di uno spirito imprenditoriale più forte; nella creazione di condizioni favorevoli all'innovazione industriale al fine di garantire che la ricerca si traduca in prodotti e processi portatori di ricchezza, sicuri e dai costi accettabili; sul rispetto dei principi etici, l'integrazione di considerazioni di tipo sociale nelle fasi iniziali del processo di ricerca e sull'incentivazione del dialogo con i cittadini; sulla considerazione tempestiva dei rischi suscitati dai prodotti derivati dalle nanotecnologie per la sanità pubblica, la sicurezza e la salute sul posto di lavoro, l'ambiente e i consumatori; sull'integrazione delle suddette azioni mediante la cooperazione e altre iniziative adeguate a livello internazionale.

⁴³ Per i risultati di tale consultazione, conclusasi il 15 ottobre 2004, cfr. la relazione *Nanoforum*, in <http://www.nanoforum.org>.

⁴⁴ Cfr. il documento COM(2005) 243 def. del 7 giugno 2005, anche in *Guce* n. C172 del 12 luglio 2005, p. 22. È significativo rilevare che il nuovo documento della Commissione pone finalmente sullo stesso piano di interesse, a partire dal titolo, la nanoscienza e la nanotecnologia, soddisfacendo così non solo elementari esigenze di ordine metodologico e concettuale, ma anche le osservazioni di quanti avevano rilevato, nella comunicazione del maggio 2004, un'attenzione incentrata più sulle applicazioni tecnologico-industriali e commerciali, che sulla ricerca scientifica: basti pensare che nel testo della comunicazione in parola il termine "nanoscienza" compare una volta sola.

⁴⁵ Per quanto riguarda il settore delle nanobiotecnologie, la Commissione precisa che il Piano d'azione in parola costituisce un complemento della strategia europea sulle scienze della vita e la biotecnologia, adottata dalla Commissione nel 2002 [cfr. il documento COM(2002)27 def. del 23 gennaio 2002, anche in *Guce* n. C55 del 2 marzo 2002, p. 3]. Qualche perplessità suscita l'orientamento espresso in materia dalla Commissione europea, che si limita ad operare un richiamo vago al principio di precauzione, circoscrivendo la sua applicazione ai «rischi realistici di una certa gravità». Tale campo di applicazione differisce da quello riconosciuto dalla comunicazione sul principio di precauzione adottata nel 2000 dalla Commissione [cfr. il documento COM(2000)1 del 2 febbraio 2000], secondo cui il principio di precauzione «trova applicazione in tutti i casi in cui una preliminare valutazione scientifica obiettiva indica che vi sono ragionevoli motivi di temere che i *potenziali pericoli* potrebbero avere effetti negativi sull'ambiente o sulla salute degli esseri umani, degli animali e delle piante, ma i dati scientifici non consentono una valutazione particolareggiata del rischio» (corsivo aggiunto).

⁴⁶ Cfr. COM(2005)119 del 6 aprile 2005, in *Guce* n. C125 del 24 maggio 2005, p. 12.

nanotubi), mediante la realizzazione di studi tossicologici ed ecotossicologici, nonché lo sviluppo di metodologie e strumenti adeguati per il monitoraggio e la riduzione dell'esposizione agli agenti potenzialmente nocivi, in particolare sui luoghi di lavoro (quali i laboratori di ricerca). A queste priorità si aggiunge, infine, l'incentivazione del sostegno alle nanotecnologie nei settori considerati fondamentali per la competitività dell'Europa comunitaria, quali la medicina, la chimica e lo spazio. Agli scopi indicati, e tenendo conto che l'infrastruttura di ricerca scientifica e d'innovazione nel settore delle nanotecnologie presuppone una massa critica di risorse che talvolta può superare le possibilità dei singoli governi, il Piano d'azione auspica la creazione ed il rafforzamento di poli di eccellenza attraverso l'istituzione di apposite reti universitarie, l'integrazione delle risorse transnazionali, nonché la cooperazione delle piccole e medie imprese.

Poiché la strategia sottesa al Piano d'azione è prevalentemente volta a favorire lo sviluppo industriale e commerciale, in coerenza con gli scopi mercantilistici dell'Unione europea, il documento della Commissione si occupa inoltre dei profili relativi alla promozione ed al sostegno dell'innovazione tecnologica delle imprese e della protezione dei diritti di proprietà intellettuale, anche attraverso l'istituzione di un sistema di monitoraggio dei brevetti nel settore in parola, l'armonizzazione delle pratiche di trattamento delle domande di brevetto a livello internazionale e il raggiungimento di un accordo sull'adozione del brevetto comunitario⁴⁷. Sul piano della cooperazione internazionale, infine, la Commissione propone di adottare un atto non vincolante, quale una dichiarazione o un "codice di buona condotta", per l'uso e lo sviluppo responsabili delle nanotecnologie, che ponga le basi di un sistema aperto e condiviso di nomenclatura, metrologia e valutazione dei rischi e che permetta di creare, tra l'altro, una base di dati tossicologici, ecotossicologici ed epidemiologici, nonché un archivio elettronico europeo delle pubblicazioni scientifiche sulle nanotecnologie. La Commissione, inoltre, invita gli Stati membri a rafforzare il sostegno accordato alla ricerca scientifica ed a potenziare in questo settore la cooperazione con i Paesi meno sviluppati, evidenziando, al contempo, il contributo delle applicazioni nanotecnologiche ai fini del conseguimento dell'obiettivo dello sviluppo sostenibile⁴⁸.

Passando infine ad esaminare l'attività condotta in materia dai c.d. enti di normazione, può ricordarsi che, all'inizio del 2005, su impulso del British Standard Institution (l'Ente nazionale di normazione del Regno Unito), la Segreteria centrale dell'International Organisation for Standardization (ISO) ha chiesto ai propri membri di valutare l'opportunità di aprire un nuovo filone regolatorio relativo alle nanotecnologie (ISO/TS/P199). Tale iniziativa, in sostanza, mira ad istituire un comitato tecnico (ISO/TC229) che si occupi di normazione nel campo delle nanotecnologie, con specifico riferimento alla classificazione, alla terminologia, alla nomenclatura, alla metrologia di base, alla caratterizzazione (comprese taratura e certificazione), agli aspetti ambientali ed alla gestione del rischio. In tale prospettiva, i relativi metodi di prova dovrebbero comprendere procedure per la determinazione delle caratteristiche fisiche, chimiche, strutturali e biologiche di quei materiali e dispositivi le cui prestazioni, nell'uso previsto, dipendono da una o più dimensioni inferiori a 100 nanometri.

E' agevole osservare che la proposta dell'ISO tiene conto della prevedibile crescita delle applicazioni industriali delle nanotecnologie e della loro probabile diffusione anche in ambito domestico. Il conseguente impatto di tali applicazioni, in settori che variano dalle comunicazioni alla sanità e dall'industria manifatturiera e dei materiali alle tecnologie dell'informazione, ha indotto l'ISO a dotarsi degli strumenti necessari, da una parte, per fornire ai ricercatori, all'industria e ai decisori politici un complesso di regole atte a sostenere lo sviluppo tecnologico e commerciale dei prodotti che utilizzano le nanotecnologie; e, dall'altra, per offrire alla società civile gli strumenti appropriati per la

⁴⁷ Altra priorità indicata dal Piano d'Azione è quella relativa al rafforzamento dell'istruzione, della formazione e dell'apprendimento interdisciplinare, che coinvolga le scienze esatte, umane e sociali.

⁴⁸ Nei termini, precisa la Commissione, di depurazione dell'acqua, alimentazione sana e sicura, somministrazione più efficace di vaccini, riduzione dei costi dei controlli sanitari, conservazione ed impiego più efficienti dell'energia.

valutazione dei rischi e per la tutela della salute e dell'ambiente. Nello stesso senso si è attivato anche l'European Committee for Standardization (CEN), che, all'inizio del 2004, ha istituito un gruppo di lavoro sulle nanotecnologie nell'ambito del proprio *Bureau Technique* (CEN/BT/WG166). Tale gruppo di lavoro ha il compito di consultare le parti interessate per predisporre una strategia che individui possibili risposte alle aspettative del mercato; esso, inoltre, intende offrirsi quale punto di coordinamento e di collegamento con altre iniziative riferite alle nanotecnologie condotte nei singoli Paesi europei (come nel caso, per l'Italia, dell'Ente nazionale di unificazione).

6. SINTESI E RACCOMANDAZIONI BIOETICHE

Dalle nanotecnologie ci si aspettano applicazioni interdisciplinari e molto diverse tra loro: materiali resistentissimi e leggeri, farmaci in grado di colpire solo il "bersaglio" giusto, computer efficienti ed estremamente veloci. La produzione di nanomateriali (i settori trainanti sono costituiti dall'elettronica, dalla farmaceutica, dalla produzione di energia e di materiali "intelligenti") sta assumendo dimensioni significative sul piano industriale e i costi di produzione sono in costante riduzione: è quindi certo un aumento delle applicazioni nanotecnologiche, a partire dai dispositivi elettronici contenuti nelle automobili. Scienziati, industria e governi prospettano che la manipolazione della materia su scala nanometrica produrrà benefici enormi e dischiuderà prospettive applicative inimmaginabili fino a poco tempo fa, ma anche i più convinti sostenitori di queste nuove tecnologie non nascondono che strutture tanto piccole possono celare pericoli rilevanti. Ciò che non si conosce ancora della tecnologia a livello di atomi o molecole, infatti, potrebbe generare rischi potenzialmente gravi, con specifico riferimento a talune ipotizzate applicazioni, che potrebbero avere effetti negativi sulla salute dei viventi, la contaminazione ambientale, la tutela della vita privata e perfino la costruzione di nuove armi di distruzione di massa.

Questa è, in definitiva, la sintesi di quanto analiticamente esposto nelle pagine precedenti. Questo documento non intende in alcun modo porre in questione i benefici che possono derivare (e in parte sono già derivati) dal progresso delle nanotecnologie. Ma, di fronte a sviluppi che sono inevitabilmente aperti ad esiti ambivalenti, pare opportuno segnalare le questioni su cui è necessaria maggiore informazione e maggior dibattito pubblico per chiarirne tutte le implicazioni bioetiche.

Si propongono, pertanto, le seguenti riflessioni:

1) Per evitare le secche che hanno caratterizzato il dibattito sulle biotecnologie o sugli OGM, dominato perlopiù dallo sterile fronteggiarsi tra scienziati e tecnofobi, appare quindi urgente non solo favorire il coordinamento delle discipline (dall'ingegneria dei materiali, alla biologia, alle scienze sociali etc.) che concorrono a formare questo settore della conoscenza scientifica, e dei soggetti (università, centri di ricerca, imprese, agenzie governative) protagonisti della rivoluzione nanotecnologica, ma anche agevolare la comprensione dei problemi rilevanti da parte della società civile, stimolare la partecipazione della società nelle decisioni cruciali, accompagnare l'apparentemente inevitabile immissione sul mercato dei prodotti a base nanotecnologica mediante il ricorso a strumenti democratici e trasparenti di informazione, revisione e controllo⁴⁹.

In questa prospettiva, è stato rilevato in particolare che la specificità delle applicazioni basate sulle nanotecnologie potrebbe rendere necessario l'adeguamento dei tradizionali e consolidati metodi di valutazione dei rischi, in particolare nel campo delle nanotecnologie biomediche e delle nanobiotecnologie. Anche i documenti della Commissione europea prima esaminati rilevano come lo studio dei rischi potenziali per la salute pubblica e l'ambiente correlati alle nanotecnologie, oltre a presentare profili

⁴⁹ Si veda, al riguardo, le conclusioni cui perviene il documento intitolato *Mind the Gap*, pubblicato nel febbraio 2003 sulla rivista *Nanotechnology* ad opera di un gruppo di ricercatori del Joint Centre for Bioethics dell'Università di Toronto.

peculiari in ragione delle dimensioni ridottissime delle nanoparticelle, potrebbe tradursi in una vera e propria sfida per la fisica e la chimica classiche. Alcune applicazioni nanotecnologiche, infatti, generano dati tossicologici ed ecotossicologici nuovi e richiedono particolari adattamenti dei processi produttivi, di manipolazione, conservazione, trasporto e smaltimento dei prodotti da esse ottenuti, finendo per estendere le procedure di *risk-assessment* all'intero ciclo di vita di tali prodotti.

Se, allo stato attuale della ricerca scientifica, sembra difficile prevedere quali saranno le proprietà e le caratteristiche dei prodotti derivati dalle nanotecnologie per i quali vi potranno essere favorevoli condizioni di mercato (e dunque i potenziali rischi ad esse connessi), è però necessario che le applicazioni di tali tecnologie rispettino gli *standard* di tutela della sanità pubblica, dei consumatori, dei lavoratori e dell'ambiente, stabiliti tra l'altro dal Trattato di Roma e dalla Carta di Nizza sui diritti fondamentali dell'Unione europea, come anche i principi etici fondamentali riconosciuti da numerosi strumenti giuridici europei ed internazionali, quali la Convenzione di Oviedo sulla biomedicina.

La dimensione regolatrice delle nanotecnologie, in particolare, dovrà assicurare le misure preventive più idonee a neutralizzare i rischi eventualmente rilevati, salvo comunque il ricorso a misure di altra natura qualora residuino margini rilevanti di incertezza scientifica in merito all'esistenza stessa o alla portata dei rischi valutati e dei danni che potrebbero da essi derivare, soprattutto nel lungo periodo⁵⁰.

Oltre che mediante l'adeguamento delle norme esistenti e l'introduzione di codici di condotta *ad hoc*, le nuove sfide imposte da questa rivoluzione tecnologica potrebbero essere affrontate anche sul piano istituzionale, ad esempio mediante la creazione di uffici e agenzie ad hoc dell'ONU, che raccolgano l'eredità di organismi sciolti all'inizio degli anni Novanta del secolo passato (*UN Centre on Transnational Corporations* e *UN Centre on Science and Technology for Development*)⁵¹.

Nel concludere questa prima riflessione, si può affermare che le considerazioni bioetiche riguardanti quel vasto settore che va sotto la denominazione di "nanotecnologie" sono ancora limitate, e sembrano dirette per lo più ad "esaltare" (oltremisura) le potenzialità positive; oppure mettere in guardia verso le potenzialità paurosamente negative offerte da questo campo di sviluppo economico-industriale. Tali riflessioni appaiono a molti "riduttive", preconcepite e lontane dalla realtà dei fatti. Peraltro, non manca chi ha richiesto una discussione maggiormente "bilanciata" (ad es. BERT GORDIJN, 2003) ed una maggiore aderenza del giudizio alla realtà dello sviluppo attuale delle diverse iniziative ricomprese in questo settore industriale (DETERSON, 2003).

2) Pertanto, al C.N.B. è apparso utile impostare considerazioni a più ampio raggio, come di seguito.

a) Nella letteratura consultata non viene, in linea di principio, posta la domanda se sia lecito intervenire su atomi o molecole per costruire strutture funzionali a dimensioni nanometriche; vuoi per replicare quelle già esistenti in natura, o progettarne e realizzarne

⁵⁰ A queste condizioni, l'applicazione del principio di precauzione appare quindi ineludibile, proprio in considerazione del carattere incerto dei dati scientifici relativi ai rischi potenziali delle applicazioni nanotecnologiche, qualche perplessità potrebbe suscitare l'orientamento della Commissione europea, che, nel Piano d'azione del 2005, prima esaminato, si limita ad operare un richiamo vago a tale principio, circoscrivendo la sua applicazione ai «rischi realistici di una certa gravità». Tale campo di applicazione differisce da quello riconosciuto dalla comunicazione sul principio di precauzione adottata nel 2000 dalla Commissione [cfr. il documento COM(2000)1 del 2 febbraio 2000], secondo cui il principio di precauzione «trova applicazione in tutti i casi in cui una preliminare valutazione scientifica obiettiva indica che vi sono ragionevoli motivi di temere che i *potenziali pericoli* potrebbero avere effetti negativi sull'ambiente o sulla salute degli esseri umani, degli animali e delle piante, ma i dati scientifici non consentono una valutazione particolareggiata del rischio» (corsivo aggiunto).

⁵¹ In tal senso, si veda anche il documento dell'ETC Group citato alla nota 26.

altre non esistenti ma alle quali conferire (o riconoscere) proprietà particolari, inedite nell'ordine naturale delle cose.

Si prende a base della giustificazione etica il fatto che già la chimica – di per sé – opera a livello atomico e molecolare per riconoscere o manipolare la materia; cosicché – in conseguenza – utilizzare le conoscenze scientifiche che derivano dall'approfondimento degli studi sulla materia organica o inorganica per produrre nano-strutture non sarebbe – di per sé – un fatto eticamente rilevante. Si sostiene che l'azione modificatrice della natura caratterizza una tendenza innata nell'uomo, e si deve solamente prendere atto che si è capaci, in epoca contemporanea, di dominare anche questo settore a fini diversi, ancorché dotati di evidenti ricadute industriali e commerciali, esplorando nuove combinazioni di atomi e molecole.

Ma – come è noto – non tutti accettano acriticamente questa interpretazione riduttiva dello sviluppo umano, che comprende ben altre dimensioni – ivi comprese quelle di natura spirituale – che non si esauriscono nella manipolazione della materia.

Correlata a questo problema è la nota discussione etica sul pericolo dello sviluppo “autonomo”, autopoietico, della tecnologia, che sempre di più tenderebbe a distaccarsi dai bisogni reali dell'umanità. Ci si potrebbe allora porre la domanda se le nanotecnologie corrispondano a questo modello di sviluppo esagerato della industrialità.

Sul piano bioetico – la risposta non può essere che quella tradizionale: lo sviluppo tecnologico deve essere diretto verso obiettivi ben precisi e di valore personale e sociale compatibili con la sicurezza ed il bene individuale e collettivo, favorendo nel contesto democratico una partecipazione sociale alla definizione degli obiettivi stessi ed al controllo dei risultati. Anche l'industria delle nanotecnologie dovrebbe ottemperare a questi requisiti.

b) Un aspetto tuttavia singolare di questo settore – e che più propriamente interessa le questioni biomediche che ci riguardano – è connesso alla possibilità di creare strutture composte di materia organica (ad es. proteine) e materia inorganica (ad es. metalli) in manufatti di nanodimensioni, proposti come nanomotori, o nano-conduttori o nano-sensori ecc., per ottenere una amplificazione nelle dimensioni di impiego della tecnologia sia nel campo delle comunicazioni che dell'azione sanitaria (diagnostica e terapeutica).

Appare evidente che – in taluni casi – la materia organica che confluisce in nuove combinazioni con la materia inorganica rappresenta una componente bio-chimica particolarmente favorevole a ragione della sua struttura intrinseca per realizzare alcune proprietà del manufatto, e non susciterebbe di per sé problema etico, se è materia non vivente. Il problema bioetico tuttavia esiste a monte, e può riguardare talvolta lo “stato vivente” della materia organica utilizzata, ma sempre – in ogni caso – ha a che vedere con l'origine e le modalità di acquisizione della componente organica stessa. Mentre non offre problemi ad es. un c.d. reattore cellulare di una coltura di *Saccharomyces cerevisiae* vivente geneticamente modificata per elaborare farmaci incapsulata in polimero a nota permeabilità molecolare, problemi etici offrirebbe invece, per alcuni, la ipotizzata derivazione da cellule di embrione umano del reattore cellulare; oppure – a diverso livello di liceità e di problema – la produzione di reattori con cellule viventi fatta in dispregio dell'informato consenso del donatore del tessuto. Si tratta, ovviamente, solo di esempi indicativi delle sottese problematiche etico-giuridiche.

Ove ricorressero queste evenienze, si creerebbero per simili applicazioni delle nanotecnologie questioni bioetiche da considerare attentamente, ma non dissimili (nella intrinseca natura) dalle riflessioni etiche già praticate su tali problemi in applicazioni a livello di microscala o di più ampia dimensione.

Particolare “sensibilità” bioetica dovrebbe essere rivolta alla possibile produzione – ad esempio – di manufatti nanotecnologici includenti geni umani (ad es. cromosomi artificiali; nanocapsule di polimeri racchiudenti ed eroganti prodotti genetici umani) in rapporto alle “indicazioni” del loro uso, e non solamente alla aderenza alle regole della brevettazione internazionale nella loro produzione.

Ed altrettanto si porrebbero questioni bioetiche in merito alla presentazione di tali manufatti sul versante della pubblicità e della offerta commerciale verso il consumatore,

perché sarebbe doveroso informare questo ultimo dell'origine del materiale biologico eventualmente entrato a far parte del manufatto stesso, e lasciarlo libero di esercitare la sua scelta in coerenza anche alla personale sensibilità etica.

In definitiva, sotto questi profili, sembra potersi fare riferimento – anche per i nanomanufatti – a ben noti “principi” che tutelano diritti umani già da tempo sperimentati dalla bioetica e codificati dal diritto privato, pubblico, commerciale, penale etc. nazionale o internazionale per l'utilizzazione di presidi e invenzioni in risposta a vari bisogni dell'uomo, ed operanti alle normali correnti dimensioni di scala.

3) Queste considerazioni bioetiche d'ordine generale sulla “accettazione” sociale delle tecniche comprese in quell'ampissimo e composito settore che va sotto il nome di nanotecnologie – del resto – sono molto simili a quelle già discusse allorché si verificò lo straordinario sviluppo delle “biotecnologie e dell'ingegneria genetica” (si fa l'esempio degli organismi geneticamente modificati), sviluppo che pose con forza non solo la domanda della “liceità” morale della modificazione del genoma degli esseri viventi (vegetali, animali, uomo stesso), ma anche della “giustizia” nel godimento e nel più ampio accesso agli (eventuali) benefici. Queste domande dettero luogo a risposte molto differenziate, su cui non sono state prive di influenza gli apporti positivi o negativi offerti da queste tecnologie alla soluzione di problemi, soprattutto economico-sociali, emersi nei diversi contesti ambientali ed etici in cui vive la popolazione umana.

A nostro giudizio etico, maturato all'interno della società occidentale, le risposte date non sono state rispettose di ogni esigenza; ma anche in settori dove più uniforme è il giudizio “positivo” sulle stesse (si veda il caso della produzione per via biotecnologica di medicinali) assolutamente ancora sbilanciato è nelle varie popolazioni del pianeta il beneficio offerto da tali tecnologie.

Alcune autorevoli voci che hanno partecipato – in occasione di incontri internazionali – a questa iniziale riflessione bioetica sulle “ricadute” sociali delle nanotecnologie, hanno già espresso l'opinione che saranno soprattutto pochi individui e dei paesi industrialmente più avanzati a beneficiare delle stesse, mentre ancor più si approfondiranno le distanze con i paesi in via di sviluppo (v. ad es. J. C. TEALDI, 2003); altri hanno sostenuto che proprio per paesi in via di sviluppo è questa un'occasione per iniziare un capitolo di particolare fruttuosa industrializzazione (SALVATERRA, 2003). Questa opinione non appare – al momento – destinata ad andare oltre la petizioni di principio.

In ogni caso, il profilo etico del “principio di giustizia” nel beneficio potenziale è certamente fra i più sentiti nella discussione internazionale sull'argomento anche delle “nanotecnologie”, come lo è per la “biotecnologia” genetica.

4) Nel settore che particolarmente interessa il C.N.B., vanno annoverate le considerazioni bioetiche in tema di impiego delle nanotecnologie in campo sanitario, che meritano una considerazione particolarmente attenta.

La possibilità di definire una “nanomedicina” competitiva e “vincente” rispetto alla medicina pur avanzata tecnologicamente oggi praticabile (ovviamente in via unicamente prospettica, almeno per molti casi) è stata sostenuta su due filoni:

- il primo, considerato come sviluppo coerente con la tradizione medica, per il miglioramento della diagnosi e del trattamento di alcune forme morbose (ALIVISATOS, 2001; BACHMANN, 1998; CHEMLA et al, 2000; JORDAN et al., 2000; RANDAL, 2001; REICHERT et al., 2000; WEST e HALAS, 2000; WOLFE, 2002; DIASPRO, 2005);

- il secondo, innovativo ma suscettibile di molte riserve etiche – rivolto a incentivare alcune “capacità” intellettive umane, presenti ed espresse nel range di normalità, attraverso un azione di stimolo di microchips compatibili con la materia organica esercitate su circuiti nervosi e sensoriali (DREXLER, 1986; FREITAS, 1988 b; KAKU, 1997; KURZWEIL, 1999).

Si ripropone uno “schema” già altre volte discusso per un intervento genetico di “enhancement” (di cui, probabilmente, il “vettore” nanotecnologico dovrebbe consentire la più facile realizzazione).

La desiderabilità di questa seconda linea della futura nanomedicina va eticamente contestata, e giustamente GORDJN (2004) afferma che – se tale fosse il pensiero dominante nell’ambito sociale - il proseguire ricerche in questa direzione dovrebbe apparire privo di senso sul piano etico.

Non si contesta, invece, ogni sforzo ragionevole nella prima direzione, sempre che la ricerca ed i risultati attesi appaiano motivati da sostanziali benefici per la persona malata, e proporzionati altresì all’investimento delle risorse che – necessariamente – vengono sottratte ad altri settori della assistenza sanitaria.

Senza dubbio, nella letteratura sino ad ora prodotta, si afferma che notevoli risultati sono prevedibili – con l’impiego dei criteri delle nanotecnologie – nella identificazione più mirata dei bersagli dei farmaci (ALIVISATOS, 2001; BOGUNIA-KUBIK e SUBISAKA, 2002; DAVIS, 1997; MEHNER e MADER, 2001; MOGHIARI et. al., 2001; RANDAL, 2001; TATON, 2001; WEST e HALAS, 2000; WOOLIEY, 2001; WUSTHOFF, 2002); nella diagnostica (ALIVISATOS, 2001; CHEMLA et. al., 2000; RANDAL, 2001; RELCHERT et. al., 2000; WEST e HALAS, 2000; WOLFE, 2002); nelle protesi ed impianti (ALIVISATOS, 2001; BACHMANN, 1998; MURPHY e altri 2001; TATON, 2001); nella terapia del cancro (ALIVISATOS, 2001; JORDAN et. al., 2000; RANDAL, 2001; SCHATTFROM, 2000; DIASPRO, 2005).

Sembra giustificato, al momento, dare credito a queste affermazioni in quanto provenienti da ricercatori seri, in attesa tuttavia che possano arrivare documentazioni provate di praticabilità ed efficacia dell’impiego di nanovettori, o di nanosensori etc., come in letteratura ipotizzato.

5) Va trattato, infine, il problema bioetico che oggi appare fondamentale e sul quale non vi sono sufficienti informazioni: quello del rischio connesso alla sperimentazione e all’impiego delle diverse nanotecnologie, in particolare in campo sanitario.

Premesso che non è giustificato esaminare “globalmente” il “rischio delle nanotecnologie” quasi fossero una categoria omogenea – appare evidente che le informazioni sugli effetti esercitati sulla materia vivente, cellule, tessuti; organi e organismi dai singoli tipi di dispositivi nanotecnologici sono ancora fortemente carenti.

Nella società contemporanea prevale la caratteristica (messa in evidenza anche dal recente Parere del C.N.B. sul principio di precauzione; 2004) della “accettazione del rischio”; ma tale rischio dovrebbe peraltro essere fortemente controllato oltre che dai tradizionali criteri e metodi della sperimentazione di base e previa alle applicazioni biologiche e cliniche, anche da fattori educativi, monitoraggio di parametri sensibili, attribuzioni di responsabilità ai singoli, visione preventiva e non meramente repressiva dell’Autorità di controllo ecc.

Non vi è dubbio – in ogni caso – che ancora troppo poco si conosce sulla dinamica biologica fra organismo ed “ospite” per consentire attendibili previsioni sulla reazione organica all’impiego di micro-nanostrutture artificiali proposte nel campo della medicina. Ci si basa, attualmente, su ragionamenti per analogia; ma altrettanto episodiche e frammentarie sono le nozioni della stessa azione – a livello molecolare – delle microparticelle prodotte attualmente dalla società industriale e disperse nella biosfera.

Un programma di grande serietà è stato attivato dal Governo Britannico, che ha promosso una serie di indagini sugli effetti biologici delle nanoparticelle, a livello di ricerca di base anche in campo animale; inoltre fondi per la ricerca sono stati stanziati opportunamente dalla Comunità Europea e da diversi Paesi OCDE.

Sin tanto che non saranno note le reazioni a livello cellulare e tissutale – acute e croniche – degli «innesti» di materiale estraneo o geneticamente modificato (per quanto protetto da capsule di polimeri permeabili), o degli effetti di “robot analitici” miniaturizzati inseriti nelle vie digestive od altri dispositivi ancora ad es. impianti di stimolatori miniaturizzati cerebrali) nell’animale, non si potrà passare alla fase sperimentale umana.

Questo processo pre-clinico appare comunque necessario, e comporta una protratta osservazione (effetti a lungo termine).

6) Sempre sotto il profilo etico e giuridico, non si dovranno trascurare anche le possibili interferenze con la vita privata (vedi il caso delle microspie e quanto già descritto in precedenza sulle nanotecnologie della informazione) ma non dovranno nemmeno essere sottovalutati gli aspetti positivi offerti allo stesso immagazzinamento dei dati ed alla trasmissione degli stessi ipotizzati con le nanotecnologie (F. GALEMBECK, 2003) in settori di minore pericolosità e forse di più agevole controllo sociale, rispetto al settore biomedico, riguardante la sicurezza di impiego.

Va ricordato, per completezza che in merito ai rischi ambientali ed allo “sconfinamento” degli stessi nella fase di produzione di nanodispositivi sono state emanate “linee guida” (FORSESIGHT, 2000) che richiedono di limitarsi alla produzione di dispositivi non autoreplicanti e a durata controllata di azione e comunque ad inserire – in ogni programma di produzione e utilizzazione – una valutazione dell’effetto ambientale.

Può apparire pleonastico affermare che queste “linee guida” – pur minimali - debbano essere fatte rispettare da parte dell’Autorità Vigilante.

Razionalità e senso morale della responsabilità debbono – in definitiva – guidare anche lo sviluppo di questo settore, come peraltro è richiesto in ogni attività umana.

Presupposto comunque inalienabile nella valutazione etica è anche la esigenza che i benefici previsti siano aperti ai bisogni, indipendentemente da fattori sociali di discriminazione o da ostacoli economici, che la comunità dovrà allontanare con opportune forme di solidarietà.

Bibliografia essenziale

Oltre gli autori citati in nota, si veda, nella vasta bibliografia e con riferimento alle opere più recenti:

- AA. VV., Polymer-Clay Nanocomposites, T. J. Pinnavaia, G.W.Beall J. Wiley.
- Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review - ARTICLE Composites Science and Technology, Volume 61, Issue 13, October 2001, Pages 1899-1912 Erik T. Thostenson, Zhifeng Ren and Tsu-Wei Chou.
- A. DUBOIS - Polymer/layered silicate nanocomposites. Preparation, properties and uses of a new class of materials (2000).
- An analytical molecular structural mechanics model for the mechanical properties of carbon nanotubes - ARTICLE International Journal of Solids and Structures, Volume 42, Issues 11-12, June 2005, Pages 3075-3092 J.R. Xiao, B.A. Gama and J.W. Gillespie, Jr.
- An overview on the degradability of polymer nanocomposites - ARTICLE Polymer Degradation and Stability, Volume 88, Issue 2, May 2005, Pages 234-250 Jitendra K. Pandey, K. Raghunatha Reddy, A. Pratheep Kumar and R.P. Singh.
- ANDRES R.P., et al.: The design, fabrication and electronic properties of self-assembled molecular nanostructures. The Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology, Nalwa HS (Ed.), Academic Press, San Diego, 1998.
- ANGELERI E.: Quantum computing: sogno teorico realtà imminente? *Mondo Digitale*, n. 1, 2003, p. 36-50.
- ANTON et al (2001). The Global Technology Revolution:Bio/Nano/Materials Trends and their Synergies with Information Technology by 2015. RAND: Santa Monica, CA.
- Applications of Nanotechnology in Space Developments and Systems. April, 2003. VDI
- B. GORDIEN, Nanoethics From Utopian Dreams and Apocalyptic Nightmares towards a more Balanced View, in Science and Engineering Ethics, 2005, 11.
- BALDI L., CEROFOLINI G.: La legge di Moore e lo sviluppo dei circuiti integrati. *Mondo Digitale*, n. 3, 2002, p. 3-15.

- BCC (2001). Proceedings of the 4th annual BCC conference fine, ultrafine and nanoparticles Oct. 14-17, 2001. Chicago, USA.
- BINNIG G., ROHRER GERBER CH., WEIBEL E.: Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Phys.Rev. Lett.*, Vol. 49, 1982, p. 57.
- Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In greening the 21st century materials world - REVIEW ARTICLE Progress in Materials Science, Volume 50, Issue 8, November 2005, Pages 962-1079 Suprakas Sinha Ray and Mosto Bousmina.
- Boolean logic. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85,1997, p. 574-587.
- C. ZANDONELLA, The Tiny Toolkit, in *Nature*, 423, 1 maggio 2003, J. ROTHSTEIN WOLFSON, Social and Ethical Issues in Nanotechnology: Lessons from Biotechnology and Other High Technologies, in *Biotechnology Law Report*, 376- 22, Number 4 (August 2003).
- Carbon nanotubes: properties and application - REVIEW ARTICLE Materials Science and Engineering: R: Reports, Volume 43, Issue 3, 15 January 2004, Pages 61-102 Valentin N. Popov.
- Chemical Industry (2003). Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials by Design: From Fundamentals to Function. Chemical Industry Vision2020 Technology Partnership.
- CHEN Y., JUNG G., OHLBERG D., LI X., STEWART D.R., JEPPESEN J.O., NIELSEN K.A., STODDART J.F., WILLIAMS R.S.: Nanoscale molecular-switch crossbar circuits. *Nanotechnology*, Vol. 14, 2003, p. 462-468.
- Computational analysis of effect of single-walled carbon nanotube rope on molecular interaction and load transfer of nanocomposites - ARTICLE Composites Part B: Engineering, Volume 36, Issues 6-7, 2005, Pages 524-533 Jihua Gou, Zhiyong Liang, Chuck Zhang and Ben Wang.
- Comunicazione della commissione al consiglio, al Parlamento Europeo e al Comitato Economico e sociale - Nanoscienze e nanotecnologie: Un piano d'azione per l'europa 2005-2009 Bruxelles, 07/06/2005 COM(2005) 243.
- Comunicazione Della Commissione Verso una strategia europea a favore delle nanotecnologie Bruxelles, 12.5.2004 COM(2004) 338 def.
- Comunicazione della Commissione, Verso una strategia europea a favore delle nanotecnologie, Bruxelles, 12.05.2004.
- E. P. GIANNELIS, Polymer-layered Silicate Nanocomposites, *Advanced material*, vol. 8, 29-35 (1996).
- Economic Perspectives of Nanotechnology: Enormous Markets for tiny Particles. October, 2002. BASF Future Business GmbH.
- EIGLER D.M., SCHWEIZER E.K.: Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature*, Vol. 344, 1990, p. 524.
- Environmental applications and impacts of nanotechnology. Summary of evidence presented to nanotechnology working group. December, 2003. The Royal Society and The Royal Academy of Engineering.
- ETC (2003a). The Big Down: Atom Tech - Technologies Converging at the Atomic Scale. Action Group on Erosion, Technology and Concentration: Winnipeg, Canada.
- Experimental trends in polymer nanocomposites - a review - REVIEW ARTICLE Materials Science and Engineering A, Volume 393, Issues 1-2, 25 February 2005, Pages 1-11 Jeffrey Jordan, Karl I. Jacob, Rina Tannenbaum, Mohammed A. Sharaf and Iwona Jasiuk.
- F. SALAMANCA-BUENTELLO, D.L. PERSAD, E. B. COURT, D.K. MARTIN, A.S. DAAR et Al. Nanotechnology and the developing world, in *PloS Medicine*, April 2005, 2, A.
- FEYNMAN R.P.: There's plenty of room at the bottom. *Caltech's Engineering and Science*, Vol. 23, 1960, p. 22-36.

- Fullerenes, nanotubes, onions and related carbon structures - REVIEW ARTICLE Materials Science and Engineering: R: Reports, Volume 15, Issue 6, 1 December 1995, Pages 209-262 C. N. R. Rao, Ram Seshadri, A. Govindaraj and Rahul Sen.
- GALLAGHER W.J., KAUFMAN J.H., PAPWORTH S.S.SCHEUERLEIN R.E.: *Magnetic memory array using magnetic tunnel junction devices in the memory cells*. U.S. Patent 5 640 343 (IBM), June 1997.
- GRUNWALD, Nanotechnology - A New Field of Ethical Inquiry? in Science and Engineering Ethics, 2005.Tr.it. Milano, Garzanti, 1972.
- HEATH J.R. et al.: A Defect-Tolerant computer architecture: opportunities for nanotechnology. *Science*, Vol. 12, 1998, p. 1716-1721. Hellemans A.: X-rays find new ways to shine. *Science*, Vol. 277, 1997, p. 1214-1215. High-Performance VLSI Signal Processing Innovative Architectures and Algorithms, Vol. 1, Algorithms and Architectures. Ray Liu HJ, Kung Yao K (Eds), Wiley-IEEE Press, 1997.
- HOFMANN E.: Dal computer classico a quello quantistico: realizzabilità e potenziali applicazioni. *Mondo Digitale*, n. 4, 2003, p. 63-75.
- HSE (2004). Information Note - Nanotechnology, Horizons scanning information note No. HSIN1.
- IIJIMA S.: Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, Vol. 354, 1991, p. 56.
- International Technology Roadmap for Semiconductors. 2004. The Royal Society & The Royal Academy of Engineering.
- International Technology Roadmap for Semiconductors. 2004. The Royal Society & The Royal Academy of Engineering.
- Investing in Nanotechnology Report: SME participation in European Research programme, October 2004.
- J. P. DUPUY, Complexity and Uncertain. A Prudential Approach To Nanotechnology prepared for the March 1-2, 2004 meeting of the Directorate-General for Health and Consumer Protection of the European Commission, "Mapping Out Nano Risks".
- J.W. CHO, D.R. PAUL, Nylon 6 nanocomposites by melt compounding, *Polymer*, 42, 1083-1094 (2001).
- JEON HG, JUNG HT, LEE SD, HUDSON S. Morphology of Polymer/silicate Nanocomposites- High Density Polyethylene and a Nitrile Copolymer. *Polym Bulletin* 1998; 41: 107-113.
- JOACHIM C.: Bonding more atoms together for a single molecule computer. *Nanotechnology*, Vol. 13, 2002, p. R1-R7.
- K. E. DREXLER, Engines of Creation. The Coming Era of Nanotechnology.
- K. GEISER, Nanotechnology and Environmental and Public Health Considerations, in "New Solutions", Vol 14(1), 2004.
- KATO M, USUKI A, OKADA A. Synthesis of Polypropylene Oligomer-Clay Intercalation Compounds. *Journal Applied Polymer Science* 1997; 66: 1781-1785.
- KRISHNAMOORTI R, VAIA RA, GIANNELIS EP. Structure and Dynamics of Polymer-Layered Silicate Nanocomposites. *Chem Mater* 1996; 9: 1728-1734.
- LEE K.B., PARK S.J., MIRKIN C.A., SMITH J.C., MRKSICH M.: Protein. Nanoarrays generated by dippen nanolithography. *Science*, Vol. 295, 2002, p. 1702-1705.
- LENT C.S., ISAKSEN B.: Clocked molecular quantum- dot cellular automata. *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 50, 2003, p. 1890-1896.
- LIKHAREV K.: Single electron devices and their applications. *IEEE Proceedings*, Vol. 87, 1999, p. 606-632.
- M. CRICHTON, Preda, Milano, 2002.
- M. OKAMOTO, polymer/clay nanocomposites, "Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology" (H. S. Nalwa, Ed.), Vol. 8, p. 1. American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, CA, 2004.
- MARTEL R., DERYCKE V., APPENZELLER J., WIND S., AVOURIS PH.: *Carbon nanotube Field-effect transistors and logic circuits*. Proceedings of the 39th Conference on Design Automation, 2002, p. 94-98.

- Mechanics of the interface for carbon nanotube-polymer composites - REVIEW ARTICLE Thin-Walled Structures, In Press, Corrected Proof, Available online 26 August 2005, A.V. Desai and M.A. Haque.
- Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. July 2004. The Royal Society.
- Nanotechnology - size matters. Building a successful nanotechnology company. A 3i white paper in association with the Economist Intelligence Unit and the Institute of Nanotechnology.3i (2002).
- Nanotechnology in a Nutshell. 2004. ASI.
- Nanotecnologie, Dalla manipolazione degli atomi nasce il rinnovamento del sistema produttivo, per l'economia della nuova era, Alberto Bonfiglioli, Anno XLVII – N°2 – Aprile/Giugno 2002.
- Nanotecnologie: dall'atomo alle macchine molecolari, Le Scienze, Dossier, Marzo 2002.
- NEAVE J.H., JOYCE B.A., DOBSON P.J., NORTON: *Appl Phys A*, Vol. 31, 1983, p.1.
- New advances in polymer/layered silicate nanocomposites - ARTICLE Current Opinion in Solid State and Materials Science, Volume 6, Issue 3, June 2002, Pages 205-212 Daniel Schmidt, Deepak Shah and Emmanuel P. Giannelis.
- New Dimensions for Manufacturing: a UK strategy for nanotechnology, DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY, London, 2002, p. 24.
- NIELS BOEING, L'invasione delle nanotecnologie: cosa sono e come funzionano i nuovi microrobot invisibili che colonizzeranno il mondo, Orme 2005.
- Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process-A review - ARTICLE Journal of Materials Processing Technology, Volume 167, Issues 2-3, 30 August 2005, Pages 283-293 Ioannis S. Chronakis.
- P. C. LEBARON, T. J. PINNAVAIA, Z. WANG; Polymer-Layered Silicate Nanocomposites: an Overview, Applied Clay Science, 15 11-29 (1999).
- Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites - ARTICLE Polymer, Volume 46, Issue 19, 8 September 2005, Pages 8222-8232 Tony McNally, Petra Pötschke, Peter Halley, Michael Murphy, Darren Martin, Steven E.J. Bell, Gerard P. Brennan, Daniel Bein, Patrick Lemoine and John Paul Quinn.
- Polymer nanocomposites: from fundamental research to specific applications - ARTICLE Materials Science and Engineering: C, Volume 23, Issues 6-8, 15 December 2003, Pages 763-772 Hartmut Fischer.
- Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing - REVIEW ARTICLE Progress in Polymer Science, Volume 28, Issue 11, November 2003, Pages 1539-1641 Suprakas Sinha Ray and Masami Okamoto.
- Polymers and carbon nanotubes-dimensionality, interactions and nanotechnology - REVIEW ARTICLE Polymer, Volume 46, Issue 19, 8 September 2005, Pages 7803-7818 Igal Szleifer and Rachel Yerushalmi-Rozen.
- Polymers containing fullerene or carbon nanotube structures - REVIEW ARTICLE Progress in Polymer Science, Volume 29, Issue 11, November 2004, Pages 1079-1141 Changchun Wang, Zhi-Xin Guo, Shoukuan Fu, Wei Wu and Daoben Zhu.
- QIN L.C., ZHAO X., et al.: The smallest carbon nanotube. *Nature*, Vol. 408, 2000, p. 50.
- R. DAGANI, Putting the "nano" into composites, Chemical and Engineering News, 7/6/1999.
- R. W. BERNE, Towards the Conscientious Development of Ethical Nanotechnology, in Science and Engineering Ethics, 2004, 10.
- Roychowdhury, VP, Janes, DB, Bandyopadhyay, S., Nanoelectronic Architecture for Boolean Logic. Proceedings of the IEEE, 1997.
- Rubbery and glassy epoxy resins reinforced with carbon nanotubes - ARTICLE Composites Science and Technology, Volume 65, Issues 11-12, September 2005, Pages 1861-1868 Luqi Liu and H. Daniel Wagner.

- RUECKES T., KIM K., JOSELEVICH E., TSENG G.Y., CHEUNG C., LIEBER C.M.: Carbon nanotube-based nonvolatile random access memory for molecular computing. *Science*, Vol. 289, 2000, p. 94–97.
- S. IIJIMA, "Helical microtubules of graphitic carbon" - *Nature* 354, 56-58 (1991).
- S. SUBRAMONEY, "Novel nanocarbons- structure, properties and potential application" - *Adv Mat* 10 15, 1157-1171 (1998).
- Service R F (2004). Nanotechnology Grows Up. *Science* 304 1732-1734.
- *Solutions to Parallel and Distributed Computing Problems: Lessons from Biological Sciences*. Zomaya A.Y., Ercal F., Olariu S. (Eds), Wiley, 2000.
- Statement on Nanotechnology. July, 2004. ICSTI.
- Structural ceramic nanocomposites - REVIEW ARTICLE *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 17, Issue 9, 1997, Pages 1061-1082 Martin Sternitzke.
- Technology Roadmap for Nanoelectronics. 2000. European Commission (EC).
- *Technology Roadmap for Nanoelectronics*. Editor: R. Compano (European Commission), Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities, 2001.
- USUKI A, KOJIMA Y, KAWASUMI M, OKADA A, FUSUSHIMA Y, KURAUCHI T, KAMIGAITO O. Synthesis of Nylon 6-clay Hybrid. *Journal Material Research* 1993; 8:1179-1184.
- VAIA RA, GIANNELIS EP. Polymer nanocomposites: status and opportunities. *MRS Bull* 2001;26(5):394-401.
- WYNNE B (2003). Societal aspects of nanotechnology: misunderstanding science? Paper presented at EuroNanoForum Conference, 10-12 December, Trieste, Italy.
- XIA Y., ROGERS J., PAUL K., WHITESIDES G.: Unconventional methods for fabricating and patterning nanostructures. *Chem. Rev. Ed.*, Vol. 99, 1999, p. 1823–1848.
- ZANETTI M, LOMAKIN S, CAMINO G. Polymer Layered Silicate Nanocomposites. *Macromol Mater Eng* 2000; 279: 1-9.

Componenti del Gruppo di lavoro: Salvatore Amato, Paola Binetti, Adriano Bompiani, Isabella Coghi, Luigi De Carli, Renata Gaddini, Luca Marini (coordinatore), Demetrio Neri, Laura Palazzani. Segreteria scientifica: Dott. Mariangela Topa.

Esperti esterni al C.N.B.:

- Dott. Renzo Tomellini, chimico, capo dell'Unità nanoscienze e nanotecnologie presso la Commissione europea.
- Prof. Paolo Milani, Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano – Centro di eccellenza sulle Nanotecnologie.
- Prof. Enzo di Fabrizio, Università Magna Grecia di Catanzaro, membro dell'Area Science Park di Trieste
- Dott. Guido Rasi, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- Prof. Mauro Ferrari, Brown Institute of Molecular Medicine, University of Texas Health Science Center