

# **NANOTECNOLOGIA, NANOMATERIALI E NANOTUBI: UNA SFIDA ETICA ED AMBIENTALE**

*di Andrea di Matteo e Gianguido Rizzotto\**

La Nanoscienza e la Nanotecnologia rappresentano i pilastri fondamentali della nuova era industriale. La possibilità e la capacità di operare su scala nanometrica o prossima a quella atomica, in modo da modificare drasticamente, e secondo le proprie esigenze, le proprietà di un materiale, la sua morfologia, la crescita, apre le porte ad una nuova rivoluzione industriale. Lo sviluppo di nuovi materiali con resistenza meccanica 10 volte superiore all'acciaio ma con un peso specifico altrettanto più basso ci permetterà di costruire dei veicoli terrestri, marini, per l'aria o lo spazio molto più leggeri ed efficienti, riducendo notevolmente l'impatto ambientale. Dall'altro lato, come il transistor al silicio, soppiantando la vecchia elettronica a valvole, ci ha introdotti nell'era della microelettronica, i nanotubi di carbonio (CNT) costituiranno i mattoni fondamentali della nuova era della nano-elettronica <sup>1</sup>.

Recenti indagini di mercato evidenziano per le nanotecnologie e i nanomateriali un volume d'affari pari a circa \$11 milioni di miliardi <sup>2</sup> nel 2010. Tutte le tecnologie strutturali, elettroniche, medicali etc. etc., saranno in qualche modo invase dai nanomateriali aumentandone il valore aggiuntivo. Per quanto concerne i materiali tradizionali il giro d'affari previsto sarà pari a \$ 340 miliardi nel 2010. Nei prossimi 15 anni si stima una produzione di nanomateriali tale che il loro impiego invaderà, e in alcuni casi sostituirà completamente, i materiali tradizionali in quasi tutte le applicazioni tecnologiche più rilevanti, vedi tabella 1 e 2.

I nanomateriali invaderanno il nostro vivere quoti-

diano e risulta evidente che una reale affermazione di queste tecnologie potrà avvenire solo e solo se al progresso tecnologico si affianca una sfida altrettanto profonda e difficile: comprendere in anticipo l'impatto ambientale e gli effetti sulla salute di queste nuove tecnologie. L'era OGM (organismi geneticamente modificati) ha chiaramente indicato che una nuova tecnologia può affermarsi e raggiungere un successo solo attraverso il consenso generale dell'opinione pubblica. Uno sviluppo tecnologico etico che in qualche modo possa mettere in accordo gli interessi economici e l'impatto ambientale, attraverso un processo che si realizzi mediante la gestione e la quantificazione dei rischi in relazioni ai benefici e mantenendo vivo il rapporto sia con l'opinione pubblica che gli enti predisposti al controllo.

Uno studio indipendente della The Royal Society and Royal Academy of Engineering del Regno Unito <sup>3</sup>, pubblicato lo scorso luglio, evidenziando le scarse conoscenze che si hanno in merito all'impatto ambientale e gli effetti sulla salute dei nuovi nanomateriali, ha posto l'accento sull'esigenza di colmare questo ritardo il prima possibile. Il report, pur sottolineando l'esigenza di uno studio che corra l'impatto ambientale durante tutto il tempo di vita medio del prodotto, individua da subito nella produzione di nanomateriali e nano tubi i luoghi ad alto rischio di contagio. Pertanto, la Royal Academy sollecita indagini ad hoc volte a chiarire la natura del rischio a cui sono soggette le persone che operano in questi settori.

\* PST – Post-Silicon Technologies – Group STMicroelectronics, Stradale Primosole 50, 95121 Catania, Italy  
Autore per la corrispondenza: andrea.di-matteo@st.com

Applicazioni	Materiali/Dispositivi	Produzione stimata (tonellate/anni)		
		Oggi	2005-2010	2011-2020
Strutturale	Ceramiche, catalizzatori compositi, coating, film sottili, polveri, metalli	10	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
Prodotti Skincare	Ossidi Metallici (TiO <sub>2</sub> , ZnO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	> 10 <sup>3</sup>
Information and communication technology (ICT)	Single walled nanotubi, nanoelettronica, materiali per l'optoelettronica (TiO <sub>2</sub> , ZnO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), organic light-emitting diodes (OLED)	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>
Biotechnology	Nanoincapsulazione, sistemi a rilascio controllato, materiali biocompatibili, quantum dots, compositi biosensori.	> 1	1	10
Strumenti di misura, sensori, caratterizzazione	Sistemi microelettromeccanici (MEMS), sistemi nanoelettromeccanici (NEMS), scanning probe microscopi (SPM), dip-pen lithography, sistemi di scrittura diretti	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>
Ambiente	Nanofiltrazione, membrane	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>

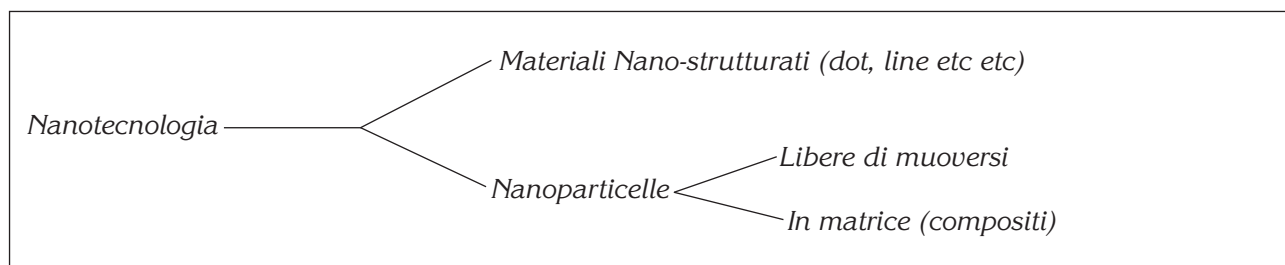
Tabella 1  
Stima globale della produzione di nanomateriali e nanodispositivi <sup>2</sup>

Prodotti	Numero di Prodotti	Mercato	Percentuale
Nanoparticelle	160	Medicale	30%
Nanotubi	55	Chimica e Materiali Avanzati	29%
Materiali Nanoporosi	22	Information and communication technology	21%
Fullereni	21	Energia	10%
Quantum Dots	19	Auto	5%
Materiali	16	Spazio	2%
Nanostrutturati	9	Tessile	2%
Nanofibre	8	Agro	1%
Nanocapsule	6		
Nanofili	5		
Dendrimeri			
<b>Total</b>	<b>321</b>		

Tabella 2  
Prodotti e tipo di Mercato delle aziende che operano nel campo dei Nanomateriali <sup>2</sup>

Le nanotecnologie, in quanto tali, non pongono rilevanti problemi di rischio per la salute. Nanoparticelle e nanomateriali, liberi di muoversi nell'aria, risultano essere sicuramente molto più pericolosi e dannosi per la salute rispetto a quelli confinati, o comunque posti in miscela, con altri

materiali (materiali compositi). Inoltre, la probabilità di un generico materiale composito di rilasciare nanoparticelle o nanotubi liberamente da una matrice deve essere bassa e controllata, in modo da ridurre i rischi d'esposizione sull'ambiente e sulle persone durante tutta la vita media del prodotto.



Schema 1: Nanotecnologia distinzioni tra nanostrutturati e nanoparticellari

Andrew D. Maynar del NIOSH <sup>4</sup>, (National Institute for Occupational Safety and Health) rilevando la peculiare natura dei materiali nanoparticellari e nanotubi, ha evidenziato che la loro tossicità risul-

ta essere più elevata se confrontata, a parità di massa, con specie chimiche equivalenti a morfologia microparticellare. La tossicità delle nanoparticelle non può essere predetta solo sulla base di

quella nota per il sistema in massa.

I principali fattori che determinano la tossicità dei nanomateriali possono essere così riassunti brevemente:

1. L'elevata area superficiale del materiale esposto;
2. La reattività chimica superficiale e la capacità di promuovere reazioni chimiche che portano alla formazione di specie radicaliche o intermedi molto aggressivi;
3. Le dimensioni fisiche delle particelle che le rendono molto insidiose e capaci di penetrare all'interno degli organi;
4. La scarsa solubilità che le rende difficili da espellere prima di avviare reazioni tossiche per l'organismo.

La tossicità di un materiale non può essere valutata e predetta solo sulla base del "paradigma della massa", ossia della quantità di materiale, presente o in sospensione, per unità d'aria, ma anche attraverso la determinazione della sua area superficiale media esposta.

Le nanoparticelle, i nanotubi e nano materiali strutturati possono entrare in contatto con l'organismo secondo le tradizionali vie di contatto: inalazione, ingestione, penetrazione cutanea ed esposizione oculare. La probabilità di depositarsi lungo le vie respiratorie e penetrare negli alveoli polmonari è determinata sia delle dimensioni delle particelle che dalla loro forma.

I nanotubi di carbonio rappresentano un caso particolare in cui la forma "rod-shape" aumenta notevolmente la loro capacità di penetrare e depositarsi negli alveoli polmonari.

L'ingestione e la penetrazione cutanea risultano essere determinanti nel caso che si utilizzano miscele di nanomateriali in sospensioni colloidali (creme) o in soluzioni <sup>5,6</sup>. Particolare attenzione è volta ai prodotti cosmetici "sunscreens" che utilizzano materiali fotoattivi e fotocatalitici come TiO<sub>2</sub> e ZnO nanoparticellare, in grado di produrre radicali liberi. Non si rilevano particolari indicazioni per quanto concerne l'esposizione oculare.

Il parametro di rischio <sup>7</sup> di un dato materiale è valutato come bilancio tra la sua tossicità e la capacità d'esposizione (capacità di diffondersi nell'area o nell'organismo). Ad esempio, un nanomateriale che presenti un'elevata tossicità, ma con una bassa capacità di diffondersi nell'aria risulta essere mediamente rischioso. I nanotubi di carbonio rappresentano un caso estremamente interessante.

Chiu-Wing Lam et al. <sup>8</sup>, del dipartimento Space and Life del Johnson Space Center NASA, conducendo una serie di studi sulla tossicità polmonare nei topi dei CNT, hanno messo in luce che la tossicità dei CNT è superiore a quella riscontrata per il carbon black e il quarzo, che di per sé è un composto estremamente tossico. Fortunatamente, la particolare forma dei CNT è tale da ridurre notevolmente la loro capacità di diffondersi liberamente in aria, con conseguente riduzione del fattore di

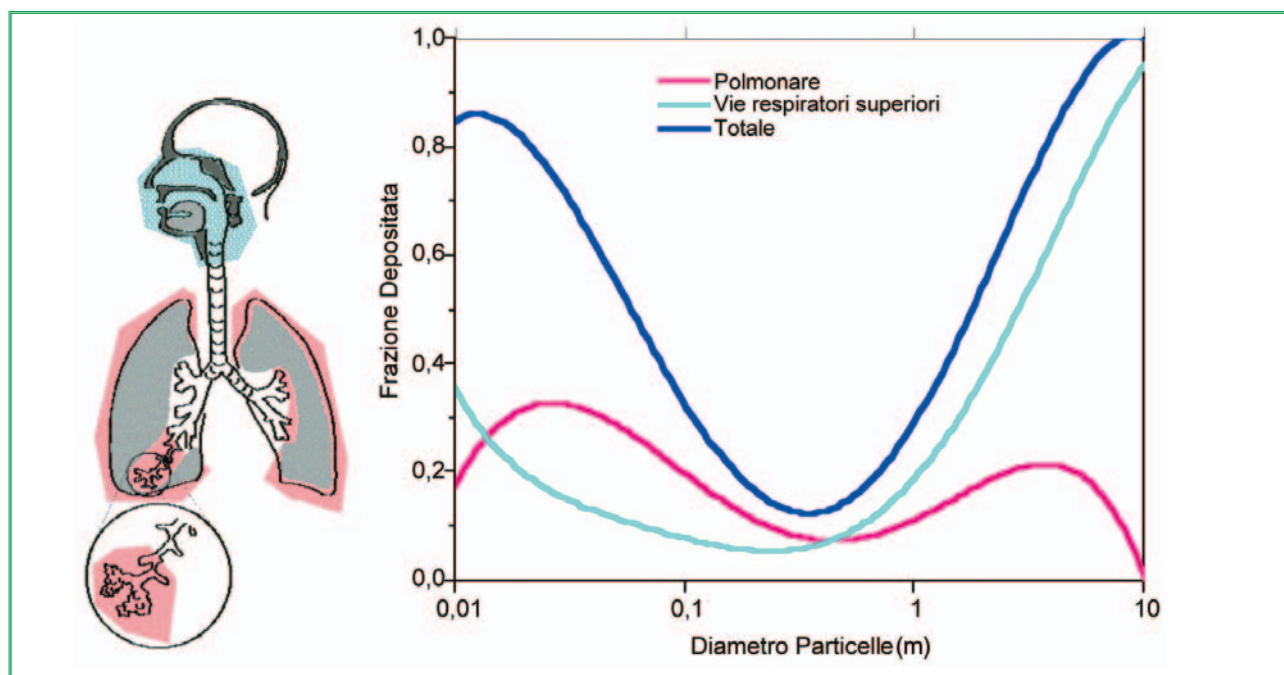


Figura 1: Inalazione e accumulo nelle vie respiratorie dei nanomateriali in funzione della loro dimensione (Secondo un modello Lung Dose Evaluation Program LUDEP, International Commission Radiology Protection ICRP)

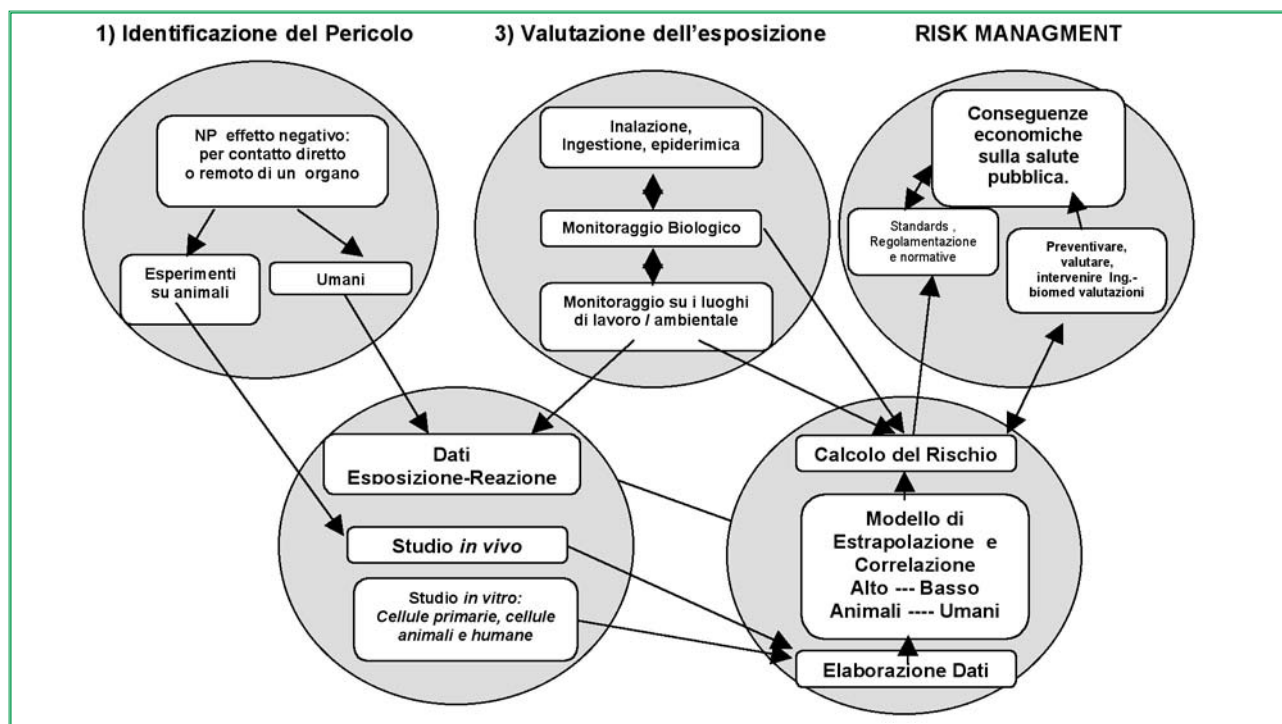


Figura 2: Valutazione e gestione del rischio per le nanomateriali (NP) sulla base del modello di Oberdörster modificato

rischio associato. Sebbene queste prime indicazioni possono essere oggetto di speculazione da parte di gruppi d'interesse più o meno politicizzati e creare una disaffezione nell'opinione pubblica rispetto alle argomentazioni nanotecnologie (vedi caso OGM), è lecito evidenziare che nessuna osservazione condotta su animali può essere in qualche modo traslata sull'uomo.

Risulta evidente, dai numerosi studi e prodotti lanciati sul mercato, che se da un lato si sta raggiungendo una buona conoscenza per quanto concerne la fabbricazione e la produzione di nanomateriali, ben poco è stato fatto nel campo della valutazione del rischio associato all'uso e all'esposizione di questi materiali. La Comunità Europea<sup>9-13</sup>, accogliendo le indicazioni provenienti da diversi studi sul settore, ha lanciato diversi programmi di analisi del rischio. Tra di essi vale la pena di segnalare: a preliminary risk analysis on the base of a workshop organized in Brussel on 1-2 March 2004 e lo studio presentato dal nanoforum: Benefits, Risks, Ethical, Legal and Social Aspects of NANOTECHNOLOGY.

Le prime commissioni di valutazioni e d'indagine hanno evidenziato l'esigenza di sviluppare nuove metodologie d'indagine, sistemi di monitoraggio e normative per la creazione di un sistema integrato per la gestione e valutazione del rischio<sup>14</sup>. Lo schema generale è riportato in figura 2.

Sulla base delle prime indicazioni, emerse nei vari

workshop, vale la pena di segnalare una proposta che prevede l'introduzione di un nuovo identificativo CAS (Chemical Abstract Service) per le nanoparticelle. Di conseguenza, ogni nuovo nanomateriale dovrà essere corredato da una nuova serie d'informazioni tossicologiche, sul modo più corretto per manipolarlo, un nuovo Material Safety Data Sheet (MSDS), risk management e risk assessment. In poche parole un nuovo corredo sicurezza.

La Commissione Europea ha esplicitamente chiesto che gli aspetti etici, d'impatto ambientale e gli effetti sulla salute fossero affrontati in tutti i progetti di ricerca afferenti all'area nanotecnologie e nanomateriali. Sottolineando l'esigenza di sviluppare le linee guida, gli standard e i sistemi di misura della tossicità delle nanoparticelle e CNT.

Gli Stati Uniti, dall'altro lato, hanno attivato una serie di finanziamenti che vedono coinvolti i più importanti istituti che si occupano di ambiente e salute:

- National Institutes of Health/ National Institute of Environmental Health Sciences ~\$ 600,000 per il 2004 e circa ~\$ 2 milioni per il 2005 con un aumento di circa ~\$ 1 milione per prossimi tre anni fino ad una stima di circa \$ 15 milioni per il 2008.
- National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) attraverso il Nanotechnology Health & Safety Research Program, ha previsto di stanziare \$ 2.3 milioni per il 2005.

- Department of Defense, stanzierà circa ~\$ 25 milioni su 5 anni
- Environmental Protection Agency (EPA) ha stanziato ~\$ 4 milioni nel 2004 prevedendo un raddoppio della cifra per il 2005.

Malgrado gli enormi benefici che può apportare alla società l'avvento delle nanotecnologie, oggi ci sono delle chiare indicazioni in merito all'impatto negativo che i nanomateriali possono avere sulla società se il loro sviluppo non viene condotto in maniera controllata e responsabile. In tal senso si sono già attivati gli organi predisposti al controllo, le aziende che operano nel campo delle nanotecnologie e gli enti di ricerca. L'intento è quello di creare una responsabilità tecnologica che permetterà uno sviluppo compatibile delle nanotecnologie e dei nanomateriali aumentandone il consenso e il dialogo con l'opinione pubblica.

Le tecniche di indagini di cui dispone oggi la comunità scientifica internazionale hanno un potenziale diagnostico enorme, non sarebbe quindi proponibile se tra 10 anni dovessimo redigere una triste casistica di patologie imputabili allo sviluppo di questi materiali ed ad un loro smaltimento improprio.

## BIBLIOGRAFIA

1. Nanomaterials –the driving force Micheal J.Pitkethly Nanoday December 2004.
2. The Nanotech Report 2004 Investment Overview and Market Research for Nanotechnology (3rd edition) Lux Research Inc., New York 2004 ([www.luxresearchinc.com/TNR2004](http://www.luxresearchinc.com/TNR2004)).
3. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties The Royal Society & The Royal Academy of Engineering Nanoscience and nanotechnologies July 2004.
4. US National Institute of Occupational Safety & Health (NIOSH) (<http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/>).
5. Hett, A., Nanotechnology, Small matter, many unknowns, Swiss Reinsurance Company, 2004.
6. Luther, W., (ed.), Industrial applications of nanomaterials – chances and risks, VDI Technologiezentrum GmbH under EU Nanosafe project.
7. Maynard A D, Baron P A, Foley M, Shvedova A A, Kisin E R & Castranova V (2004). Exposure to carbon nanotube material: aerosol release during the handling of unrefined single-walled material. *Journal of Toxicology and Environmental Health* 67A, 87–107 (2004).
8. Chiu-Wing Lam, J.T. James, R. McCluskey and R.L. Hunter "Pulmonary Toxicity of Single-Wall Carbon Nanotubes in Mice 7 and 90 Days After Intratracheal Instillation" *Toxicological Science* 77, 126–134 (2004).
9. Nanotechnologies: a preliminary risk analysis, based on a workshop on 1–2 March 2004 by the Health and Consumer Protection Directorate General of the European Commission, Brussels, 2004. [http://europa.eu.int/comm/health/ph\\_risk/events\\_risk\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/events_risk_en.htm).
10. 4<sup>th</sup> Nanoforum report Benefits, Risks, Ethical, Legal and Social Aspects of NANOTECHNOLOGY.
11. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION Towards a European strategy for nanotechnology Brussels, 12.5.2004 COM(2004) 338 final.
12. Nanotechnology – The issues "A response to the request for initial views on the Royal Society and the Royal Academy of Engineering study on nanotechnology, from the Royal Society of Chemistry.
13. GenRe Hazardous Time September 2004.
14. Oberdörster, G. (1994) Respiratory tract dosimetry of particles: Implications for setting of exposure concentrations and extrapolation modeling. In: P.G. Jenkins, D. Kayser, H. Muhle, G. Rosner, and E.M. Smith, eds. *Respiratory Toxicology and Risk Assessment. Proceedings of an International Symposium*. IPCS Joint Series No. 18. Wissenschaftlicher Verlag, Stuttgart, 83-110.

## Dizionario

**Nanoscienza** è lo studio dei fenomeni e della manipolazione di un materiale su scala atomica, molecolare e macromolecolare le cui proprietà differiscono notevolmente rispetto a quelle osservate su scala maggiore.

**Nanotecnologia** è il design, la caratterizzazione, la produzione e l'applicazione di strutture basati su di un controllo a livello nanometrico della forma e delle dimensioni delle particelle.

**Nanoparticelle** sono elementi con dimensioni inferiori al micron (< 0.000001 m).

**Materiali Nanostrutturati** sono materiali che sono costruiti grazie ad una manipolazione atomo su atomo o molecola su molecola.