



**Ettore Vittone<sup>1</sup>**  
Dipartimento di Fisica  
Università di Torino

**Cultura**

## **Scienza, Nanoscienza, Fantascienza**

### **Prefazione**

Ho accolto con piacere l'invito a fornire un contributo alla rivista "La Fisica nella Scuola", riportando quanto esposto in un seminario presentato il 24 ottobre 2013 al 52° Congresso dell'Associazione per l'Insegnamento della Fisica.

Non posso però nascondere il senso di frustrazione nell'affrontare la pagina bianca. Non si trattava infatti "solo" di descrivere a fisici lo stato dell'arte di una disciplina che coinvolge molti settori della Fisica (dalla Fisica della Materia, alla Fisica Teorica), ma anche, e soprattutto, di sottolineare che la Nanoscienza ingloba tutte le Scienze Naturali, dalla Chimica alla Biologia, dalla Scienza ed Ingegneria dei Materiali alla Matematica. Se a questo si aggiunge la sterminata letteratura scientifica disponibile in rapida espansione, cercando di separare il grano (l'informazione) dal loglio (i.e. la chiacchiera non rara in molti siti web pseudo-divulgativi), spero si possano comprendere le difficoltà nello scrivere un contributo aggiornato e sufficientemente esaustivo.

Ho quindi cercato di riassumere in queste pagine il mio personale percorso di avvicinamento alla Nanoscienza, limitandomi a considerazioni maturate dall'interazione con una competente comunità scientifica e riferendomi ad una bibliografia "certificata" e facilmente accessibile. Lungi dal voler proporre un esauriente trattato sulla Nanoscienza, questo articolo è quindi da intendersi come il modesto contributo di un fisico volto a stimolare l'interesse degli insegnanti di Fisica, e, attraverso questi, dei giovani studenti, ad un mondo in cui la Fisica gioca pur sempre un ruolo importante, ma non unico.

### **Introduzione**

Ho ancora ben presente l'invidia che provavo nel 1982 nel vedere gli amici più facoltosi giocare con i primi videogiochi (principalmente l'indimenticabile ping-pong elettronico) dopo aver collegato un meraviglioso Commodore VIC20 allo schermo televisivo. Per non parlare poi della rabbia ed impotenza nel competere con coloro che, programmando in linguaggio BASIC quella macchina fantastica, riuscivano ad invertire matrici e a risolvere sistemi algebrici in pochi secondi, a fronte delle ore spese (delle innumerevoli imprecazioni) e della grande quantità di carta consumata per applicare i tradizionali algoritmi.

Oggi, le "enormi" potenzialità di calcolo di quel primo "home computer" (1 MHz di frequenza di CPU, 64 kB di RAM) non possono che far sorridere se confrontate con quelle di un iPad-Apple (1 GHz, 256 MB). Nel giro di 30 anni, le prestazioni sono migliorate di almeno 3 ordini di grandezza, senza contare la riduzione delle dimensioni ( $404 \times 204 \times 74 \text{ mm}^3$  (senza schermo!) contro  $200 \times 135 \times 7 \text{ mm}^3$ ), del consumo (alimentazione con 5 Vdc x 1.7 A contro un consumo di 25 Wh per 10 h), il perfezionamento della qualità grafica e le innumerevoli applicazioni.

Eppure, ancora più stupefacente è che, malgrado queste abissali differenze, il prezzo di commercializzazione di un Commodore VIC20 (circa 500 euro nel 1980 [1]) è paragonabile al prezzo di un moderno computer (per confronto, il prezzo del pane è aumentato di più di un fattore 4 dal 1982 al 2010 [2]).

<sup>1</sup> Ettore Vittone: [www.dfs.unito.it/solid](http://www.dfs.unito.it/solid)

### Quando il piccolo è efficiente e conveniente

Il motivo del mantenimento dei costi dei dispositivi elettronici è riconducibile ad una legge empirica, formulata da Gordon Moore (cofondatore della società Intel) nel 1965 che prevede il raddoppio della scala di integrazione dei dispositivi elettronici (i.e. il dimezzamento della scala dei dispositivi) ogni 18 mesi [3], (Figura 1). In definitiva, più le dimensioni dei dispositivi elementari si riducono, maggiori saranno le prestazioni dei microprocessori e, contemporaneamente, minori saranno i loro costi. Questo andamento è reso possibile dall'evoluzione della "tecnologia planare" applicata alla microelettronica, avviata all'inizio degli anni '60 da J.S. Kilby, insignito nell'anno 2000 del premio Nobel per la Fisica per l'invenzione dei circuiti integrati [4]. La scalabilità dei componenti elettronici si basa sulla tecnica fotolitografica grazie alla quale è possibile definire sul materiale semiconduttore (tipicamente silicio) le strutture elementari che formano i transistor e le loro interconnessioni. La tecnica non è altro che una stampa fotografica a riduzione, in cui un'immagine di riferimento (negativo)

viene proiettata su un substrato fotosensibile, dal cui sviluppo si genera una copia dell'immagine di partenza. Parimenti, la fotolitografia utilizza come immagine di riferimento una maschera di quarzo su cui sono state disegnate in materiale opaco gli schemi dei componenti circuitali. Il sistema ottico proietta l'immagine e ne riduce le dimensioni su una resina fotosensibile, che ricopre il materiale da lavorare, la cui inerzia chimica viene modulata dall'esposizione luminosa. In tal modo è possibile esporre selettivamente gli strati sottostanti del semiconduttore ad attacchi chimici o fisici, che permettono la realizzazione dei singoli componenti e la loro riproduzione in strutture identiche su una stessa fetta di silicio. Il processo sarà tanto più economicamente conveniente quanto maggiore sarà il numero delle repliche e minore le dimensioni delle immagini fotolitografiche. Da qui la caduta vertiginosa del costo dei processori da cui deriva la diffusione capillare dei dispositivi elettronici presenti praticamente in ogni manufatto tecnico (dalla lavatrice all'astronave); parimenti, l'estensione del mercato dei microprocessori alimenta la produzione e giustifica gli investimenti in ricerca e sviluppo.

La scalabilità della tecnica fotolitografica ha portato a realizzare chip con strutture di dimensioni ancora più piccole della lunghezza d'onda del fascio di luce utilizzato: nel 2012, Intel ha annunciato la produzione di un transistor con una regione attiva di 22 nm, ovvero di dimensioni tali che il punto fermo al termine di questa frase ne potrebbe contenere almeno 6 milioni [5]. Questo è il dominio delle nanotecnologie che sono appunto definite come quelle discipline preposte alla manipolazione della materia in un intervallo dimensionale dell'ordine del miliardesimo di metro [6]. Il prefisso "nano" indica infatti nel Sistema Internazionale un sottomultiplo dell'unità pari a  $10^{-9}$ , quindi l'ambito

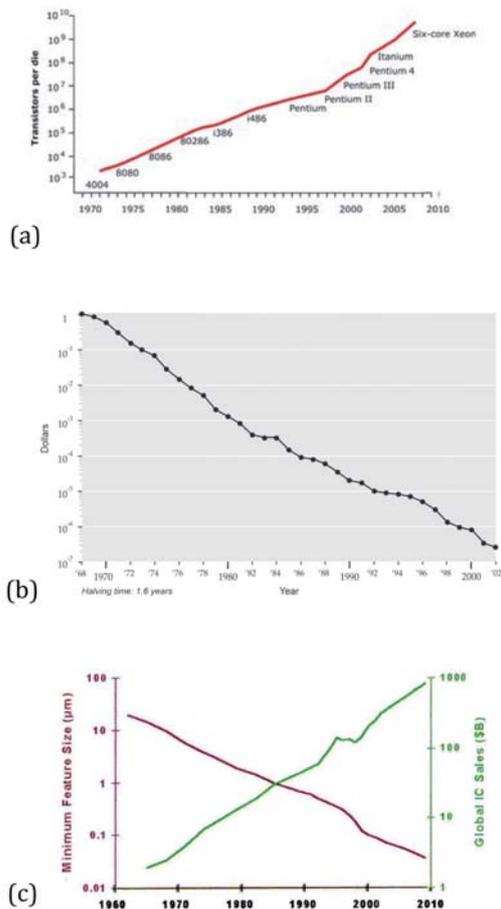


Figura 1. (a) evoluzione del numero di transistor per microprocessore in rapporto alla legge di Moore; (b) prezzo medio per transistor per anno; (c) evoluzione delle dimensioni dei transistor (scala sx) e del mercato globale dei circuiti integrati (scala dx) [4].

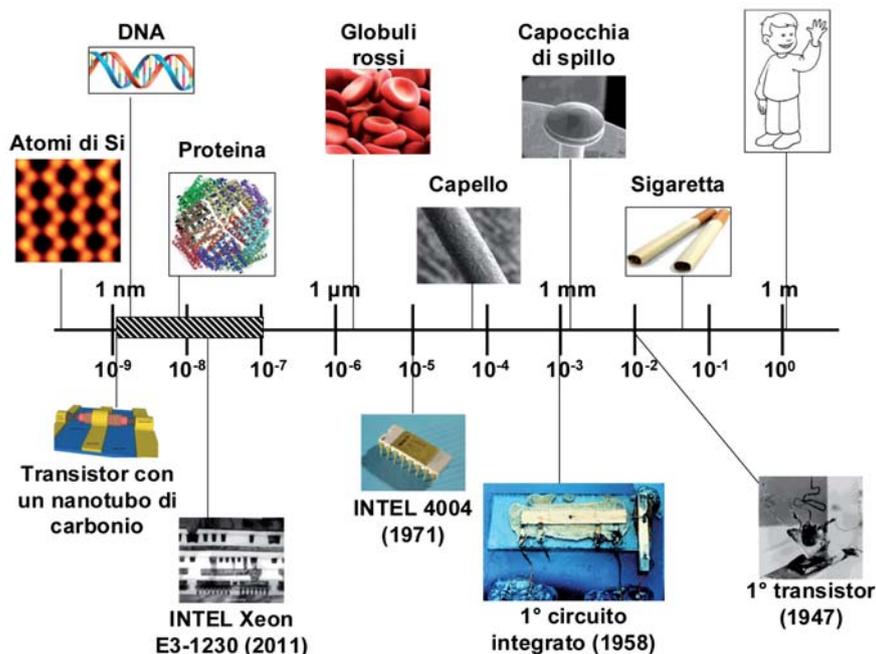


Figura 2. Dimensioni di alcuni sistemi in confronto con il dominio (rettangolo tratteggiato) delle nanotecnologie.

delle nanotecnologie riguarda oggetti e fenomeni in una scala dimensionale di diversi ordini di grandezza inferiore alla scala umana, come rappresentato schematicamente in Figura 2.

### Manipolare gli atomi

L'intuizione che si potesse giungere a manipolare la materia su scala nanometrica si deve a Richard Feynman [7], che nel 1959 cercò di convincere i partecipanti al convegno annuale dell'American Physical Society che è possibile trascrivere i 24 volumi dell'Enciclopedia Britannica sulla punta di uno spillo dato che "...i principi della fisica non impediscono di manipolare le cose atomo per atomo. Non è un tentativo di violare alcuna legge; è qualcosa che in principio può essere fatto, ma in pratica non è successo perché siamo troppo grandi". Nel corso di questi ultimi 40 anni si sono quindi sviluppate delle tecnologie e degli strumenti, quali i microscopi a scansione di sonda (STM-*Scanning Tunneling Microscope*, AFM-*Atomic Force Microscope*), che permettono non solo di aprire una finestra per l'occhio umano sull'infinitamente piccolo, ma anche di manipolare i singoli atomi, come spettacolarmente mostrato dal famoso "quantum corral (recinto quantico)", realizzato presso IBM nel 1993, posizionando con un STM singoli atomi di ferro su un substrato di rame (Figura 3, [8]). I 48 atomi di ferro posizionati sulla circonferenza del recinto producono barriere di potenziali che confinano gli stati quantici degli elettroni sulla superficie del rame e, quindi, le strutture concentriche all'interno del recinto rappresentano stati stazionari della funzione d'onda elettronica. In altri termini, quando gli elettroni sono confinati in scale dell'ordine della lunghezza d'onda di de Broglie, il loro comportamento è dominato da effetti puramente quantomeccanici [8].

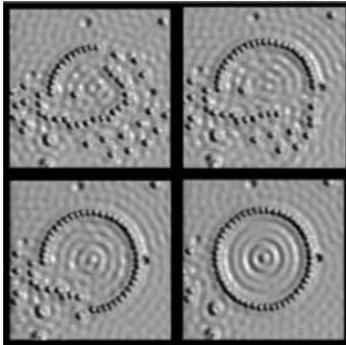


Figura 3. Una successione di immagini STM che mostrano la formazione di un "quantum coral" da 48 atomi di Fe adsorbiti sulla superficie di rame orientato (111). Il diametro medio dell'anello è di 14.26 nm; la distanza fra gli atomi di ferro è di circa 1 nm.

Tale evidenza permette quindi di introdurre l'importante osservazione per cui la manipolazione della materia alla nanoscala non può ridursi al "solo" e "semplice" sviluppo della tecnologia (nanotecnologia, appunto) volta alla miniaturizzazione ed integrazione di componenti in regioni spaziali sempre più piccoli; quando infatti le dimensioni caratteristiche degli oggetti e dei fenomeni studiati diventano confrontabili a quelle atomiche, è richiesto un sostanziale cambio concettuale indirizzato al superamento di un approccio classico o semi-classico per giungere ad una interpretazione essenzialmente quanto-meccanica. Ed è un approccio concettuale necessario non solo per interpretare esperimenti di punta in laboratori super-specializzati. Si consideri ad esempio che nel computer su cui sto scrivendo queste note, stanno funzionando processori con un volume attivo contenenti qualche centinaio di atomi, ovvero in un dominio dimensionale in cui si manifestano proprietà che si collocano a cavallo tra quelle dei singoli atomi e le proprietà di tipo "bulk" di una struttura a stato solido.

Il passaggio dalla manipolazione della materia dalla macro (o micro) scala alla nanoscala apre quindi nuove prospettive per una sterminata gamma di applicazioni, dovute al fatto che la materia nano strutturata può presentare proprietà radicalmente diverse da quelle presenti in campioni macroscopici. Ad esempio, la deposizione di uno strato sottile (~10 nm) di un materiale semiconduttore racchiuso fra due semiconduttori con *energy gap* diversa permette il confinamento bidimensionale dei portatori di carica lungo il piano di deposizione (*quantum wells* o "pozzi quantici", Figura 4). Nel film sottile si presenteranno quindi livelli energetici degli elettroni diversi (e totalmente ingegnerizza-

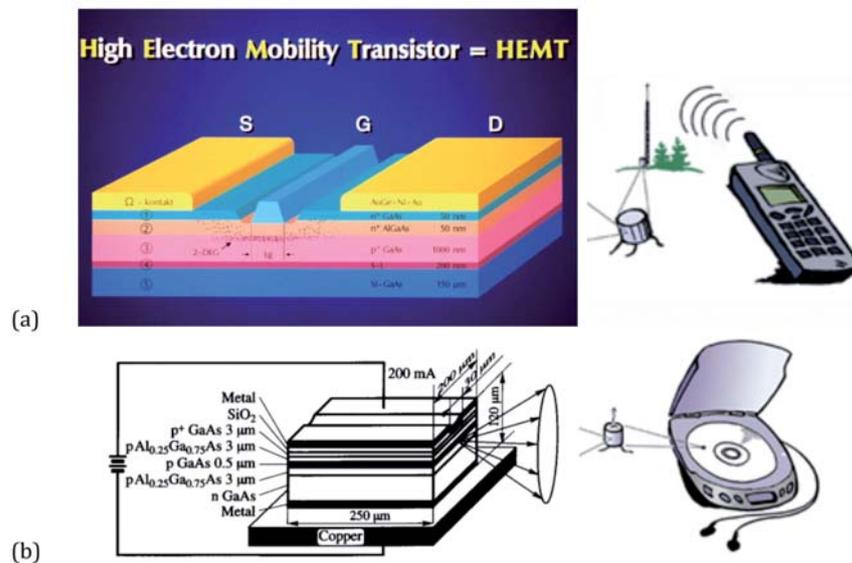


Figura 4. Un semiconduttore ad etero struttura è costituito dall'impilamento di strati sottili di diversi materiali semiconduttori caratterizzati da diversi valori di *band gap* [4]. (a) schema di un etero-transistor (HEMT: *High Electron Mobility Transistor*) che tipicamente opera a frequenze superiori a 100 GHz con applicazioni in telefonia mobile. (b) schema del primo laser ad etero struttura; questi laser hanno reso possibili le moderne telecomunicazioni, così come lo sviluppo di apparecchi di largo consumo (CD player o lettori di codici a barre).

bili) rispetto allo stesso materiale in forma massiva. Questo ha avuto importanti ripercussioni nelle telecomunicazioni attraverso lo sviluppo di transistor ad alta velocità o la realizzazione di etero strutture per la fabbricazione di laser o modulatori elettro-ottici (da cui il premio nobel per la Fisica a Z.I. Alferov e H. Kroemer [4]).

Riducendo ulteriormente la dimensione, è possibile confinare gli elettroni in “fili quantici” (*quantum wires*), ovvero in strutture in cui gli elettroni possono muoversi in una dimensione attraverso canali conduttivi o semi-conduttivi. Un nano tubo di carbonio è l'esempio classico di solido unidimensionale costituito da una struttura cilindrica di atomi di carbonio disposti a nido d'ape, che si può pensare essere ottenuta arrotolando un piano reticolare della grafite (grafene) a base esagonale (Figura 5). Le dimensioni sono tipicamente di qualche nanometro di diametro, più di 100 micrometri in altezza e possono esibire un comportamento conduttivo o semi-conduttivo in rapporto al diametro e all'angolo cui risulta avvolto il foglio grafenico.

Nel primo caso, dato che la conduzione avviene essenzialmente in superficie, praticamente in assenza di impurezze e/o difetti reticolari, i portatori si muovono con un'altissima mobilità, in moto quasi balistico, i.e. in assenza di *scattering* con il reticolo, rendendo quindi il “nano-filo” un eccellente conduttore adatto a realizzare interconnessioni capaci di sopportare densità di corrente tre ordini di grandezza superiori a quelle di altri metalli nobili (e.g. Au o Ag). Il confinamento degli elettroni attorno alla circonferenza del nano tubo induce anche la quantizzazione dei livelli energetici, per cui la conduzione elettrica avviene “attraverso stati elettronici discreti e ben separati la cui coerenza, nel senso quanto-meccanico, si estende per la lunghezza del nano tubo” [9], come mostrato in Figura 5.

Riducendo ulteriormente la dimensione delle strutture, si ottengono “punti quantici” (*quantum dots*), in cui gli elettroni sono confinati in regioni di dimensione dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda di de Broglie. Analogamente al modello della buca di potenziale tri-dimensionale, si ottengono livelli elettronici discreti, la cui spaziatura è funzione (inversamente proporzionale al quadrato) della dimensione del nano cristallo. Come mostrato nella

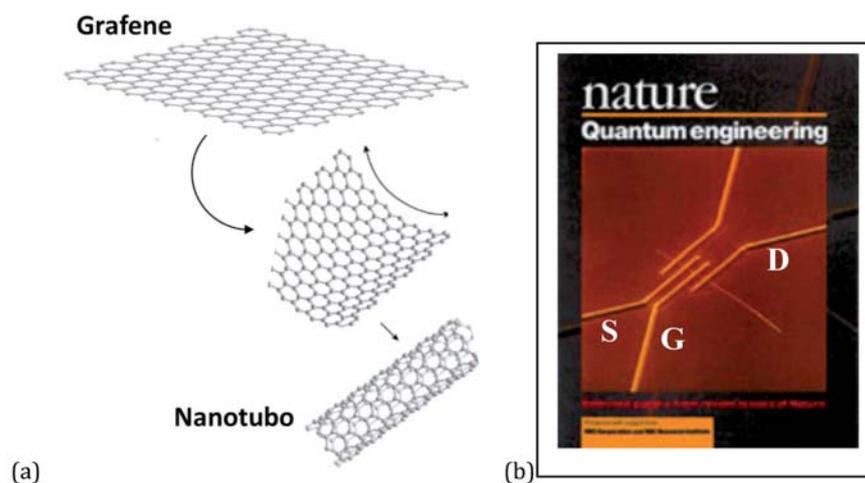


Figura 5. (a) Il nanotubo di carbonio può essere inteso come una struttura cilindrica ottenuta dall'avvolgimento di un piano reticolare della grafite (grafene); (b) La copertina della rivista Nature del gennaio 1998 che mostra un'immagine di un singolo nano tubo di carbonio connesso a 4 elettrodi di tungsteno (larghi 80 nm), un transistor è quindi realizzato utilizzando tre di questi come elettrodi di *source* (S), *gate* (G) e *drain* (D).

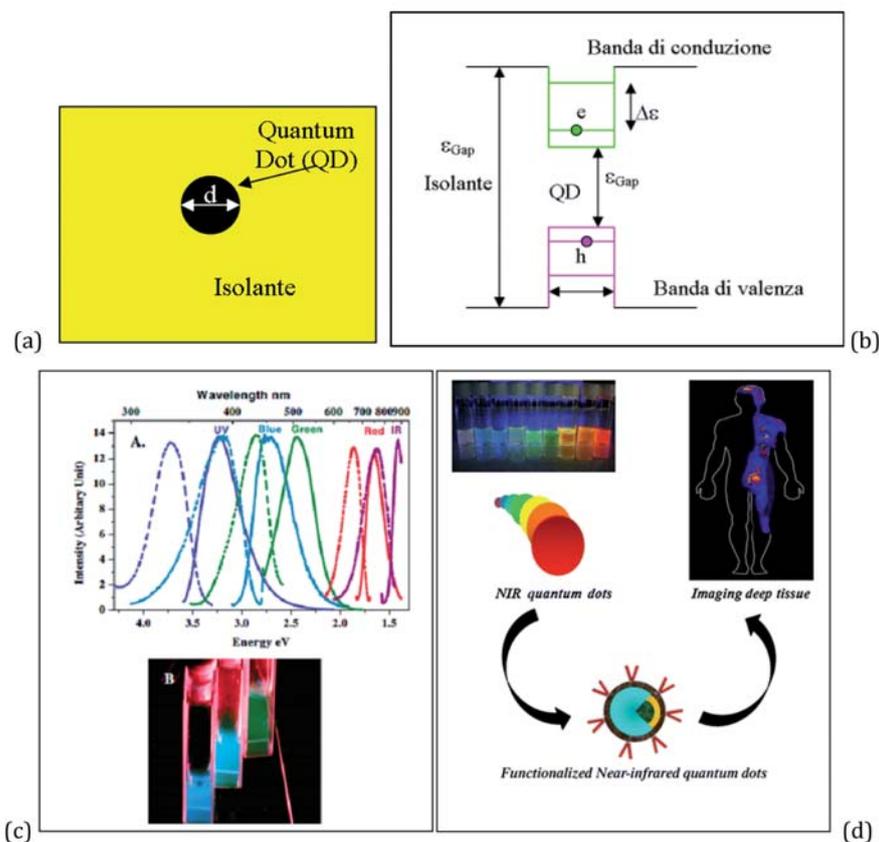


Figura 6. (a) un quantum dot inteso come una struttura quantica puntuale inglobata in un materiale isolante; (b) modello a bande di energia. (c) Spettri di emissione (linee continue) prodotti dall'eccitazione di nano particelle di oro di diverse dimensioni inglobate in una matrice polimerica. Gli spettri di eccitazione sono rappresentati dalle curve tratteggiate. Sotto è riportata l'immagine delle soluzioni contenenti 5, 8 e 13 atomi eccitati con luce UV centrata a 366 nm [10]. (d) Principio di applicazione di punti quantici funzionalizzati che emettono nel vicino infrarosso (NIR) per la visualizzazione "in-vivo" di tessuti cancerogeni [12].

Figura 6, si può in questo modo modulare la variazione di energia associata alla ricombinazione di un elettrone in banda di conduzione con una lacuna in banda di valenza, potendo in questo modo ottenere emissione di fotoni ad una lunghezza d'onda che dipende dalla dimensione del punto quantico.

Per esempio, punti quantici di oro formati da 5, 8, 13, 23 o 31 atomi presentano emissione in fluorescenza a diverse lunghezze d'onda, rispettivamente ultravioletto, blu, verde, rosso ed infrarosso [10].

In optoelettronica, le applicazioni di questi punti quantici sono molteplici. Ad esempio, presso i *Sandia National Laboratories* (USA) sono state sviluppate lampade a fluorescenza (le comuni lampade "al neon") le cui pareti interne sono ricoperte da nano particelle di solfuro di cadmio. Queste assorbono la luce ultravioletta prodotta dalla scarica elettrica che attraversa il tubo, ed emettono luce a lunghezze d'onda nel visibile con un'efficienza luminosa ben maggiore delle lampade che usano fosfori convenzionali. Sostituendo al tubo a fluorescenza un LED (*Light Emitting Diode*) nel blu/violetto è possibile ottenere luce bianca analoga a quella di una normale lampadina ad incandescenza di 60 W con un risparmio energetico di circa 80% [11].

Il maggiore utilizzo dei punti quantici riguarda tuttavia le applicazioni medico-biologiche. Infatti alcune nano particelle, come quelle di seleniuro di cadmio, possono avere la superficie funzionalizzata con biomolecole (ad esempio anticorpi) che possono etichettare alcune funzionalità cellulari. In questo modo è possibile localizzare la proteina all'interno della cellula sfruttando la luminescenza della nano particella. Rispetto ai comuni fluorofori organici, i punti quantici sono fotostabili, i.e. non degradano nel tempo di esposizione ed hanno un'efficienza di luminescenza almeno un ordine di grandezza superiore. Presso il *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), sono stati prodotti punti quantici che emettono nel vicino infrarosso (NIR). Poiché in tale intervallo spettrale è minimo l'assorbimento della radiazione luminosa da parte del tessuto, è possibile la localizzazione "in vivo" dei nano-fluorofori, quindi di cellule "marcate" ed in particolare di linfonodi che frequentemente catturano cellule cancerogene [12].

Vi sono altri effetti osservabili a livello macroscopico strettamente legati alla dimensionalità delle particelle metalliche. Quando queste vengono investite dalla luce di una determinata lunghezza d'onda, gli elettroni di conduzione iniziano ad oscillare, comportandosi come oscillatori forzati accoppiati. La frequenza di oscillazione elettronica collettiva prende il nome di risonanza plasmonica di superficie (SPR), la quale produce un incremento locale consistente del campo elettrico dell'onda elettromagnetica ed è responsabile della colorazione caratteristica delle nano particelle. Gli antichi vetrai sfruttarono questo effetto per realizzare vetri colorati, fra cui il celeberrimo Vaso di Licurgo, alcune vetrate artistiche medioevali (Figura 7) o decorazioni a lustro delle ceramiche rinascimentali [13]. È interessante notare che la preparazione

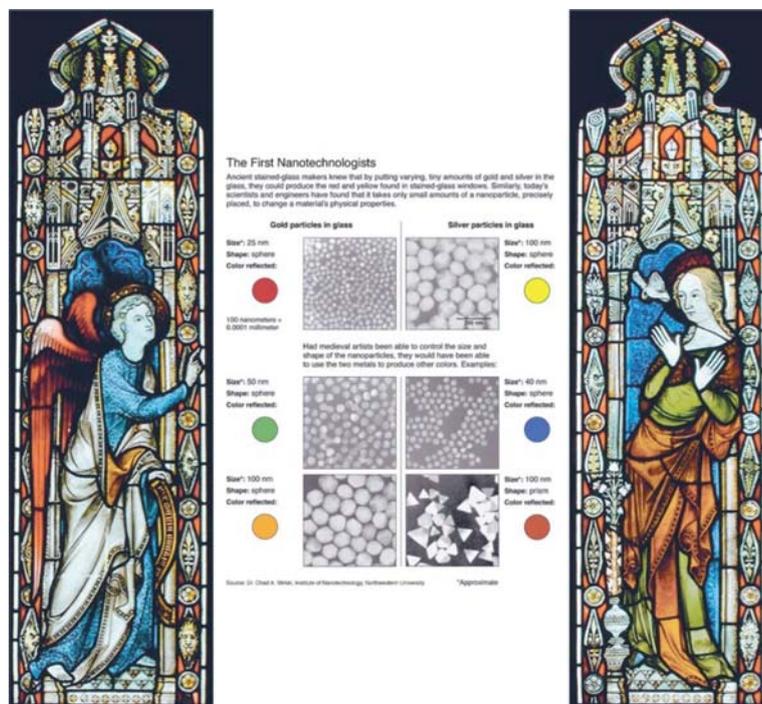


Figura 7. In alcune antiche vetrate il colore era ottenuto attraverso l'inglobamento nella matrice vetrosa di particelle di oro o di argento di dimensioni diverse. Le immagini sono tratte da un articolo del New York Times del 22.02.2005.

di queste ceramiche prevedeva l'uso di sali di Ag o Cu in soluzione con aceto di vino e quindi il riscaldamento a 600°C in atmosfera riducente (tramite fascine di ginestra secca). Gli ioni di rame o argento migravano alla superficie dove si trasformavano in atomi metallici che si aggregavano formando nano particelle inglobate in una pasta vetrosa [13].

### Approcci top-down e bottom-up

È interessante a questo punto notare che l'approccio seguito dagli antichi vetrai o ceramisti, e che non differisce molto da quello adottato al giorno d'oggi per la creazione di nano strutture per la nano fotonica, è radicalmente diverso da quello descritto precedentemente per la micro- (o meglio nano) elettronica. "Riscaldare" alla nanoscala i materiali massivi (per realizzare ad esempio dispositivi elettronici) viene indicato come approccio top-down (dall'alto al basso, dal grande al piccolo).

L'assemblaggio dei nano-materiali (ad esempio di nano particelle metalliche) partendo da atomi o molecole, costituisce un secondo metodo di studio che viene generalmente indicato come approccio bottom-up (dal basso verso l'alto, dal piccolo al grande, Figura 8).

Con l'approccio bottom-up è possibile realizzare una gamma pressoché infinita di materiali nanostrutturati, alcuni dei quali inesistenti in natura, con proprietà inusuali e comunque diverse da quelle dei materiali cristallini ordinari di uguale composizione chimica. Per esempio, aggregati di pochi atomi di oro presentano attività catalitica laddove il materiale cristallino è notoriamente inerte; essi costituiscono un catalizzatore di primaria importanza per la riduzione dell'inquinamento, in quanto possono decomporre gli ossidi di azoto ed il monossido di carbonio in sostanze innocue ( $N_2$  e  $CO_2$ ).

I fattori che supportano l'effetto catalitico delle nano particelle d'oro di dimensioni non superiori a 4 nm sono principalmente dovuti a [14]:

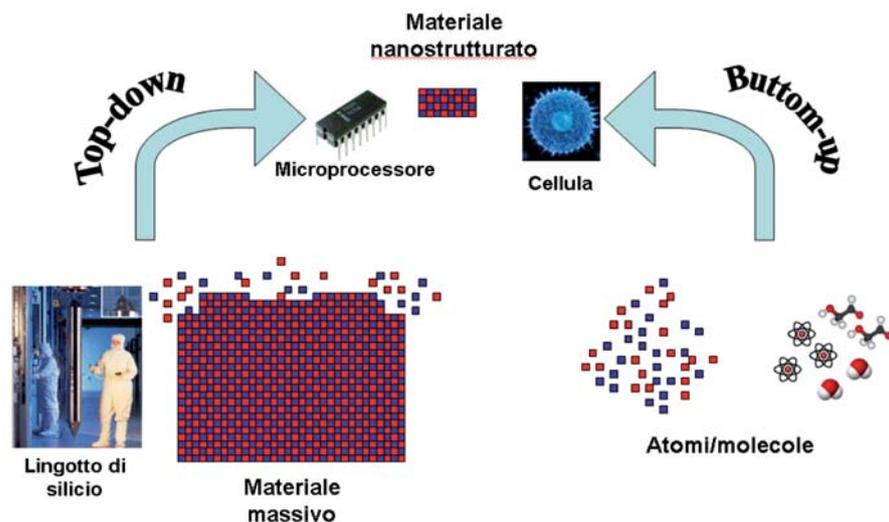


Figura 8. I due approcci alla base della produzione delle nano strutture: (top-down) la riduzione progressiva della dimensione a partire da materiali macroscopici (dal lingotto di silicio al chip) oppure (bottom-up) l'assemblaggio di componenti su scala atomica o molecolare (dalle molecole alle cellule).

1. la frazione di atomi in superficie aumenta e poiché essi sono maggiormente liberi negli stati di vibrazione, la temperatura di fusione diminuisce e la loro mobilità aumenta;
2. una maggior frazione di atomi vengono a contatto con il supporto e la corrispondente area di contatto per unità di massa del metallo aumenta;
3. poiché la sovrapposizione degli orbitali elettronici decresce in conseguenza del minore numero medio di legami tra gli atomi, la struttura a bande si indebolisce e gli atomi di superficie, in particolare, si comportano come atomi singoli, piuttosto che come insieme di atomi.

I primi due punti introducono un altro concetto peculiare del mondo alla nano-scala: la dispersione, ovvero il rapporto fra il numero di atomi della superficie rispetto al numero di atomi totali di una particella. In un corpo macroscopico il numero di atomi sulla superficie è una frazione infinitesima del numero totale di atomi, mentre in una nano particella la dispersione è prossima all'unità. Ad esempio un cubo di 1 cm di lato di oro contiene circa  $6 \times 10^{22}$  atomi, di cui solo circa  $10^{16}$  giacciono sulla superficie (dispersione  $< 10^{-6}$ ); un cubo di lato 4 nm contiene meno di 4000 atomi di cui circa 1500 sulla superficie, con una dispersione di circa il 40%. Questo spiega l'enorme amplificazione della reattività superficiale dei materiali nanostrutturati: a parità di atomi di oro, il cubo macroscopico offre una superficie per reagire con l'ambiente di  $6 \text{ cm}^2$ ; se gli atomi sono aggregati in nano particelle cubiche di lato 4 nm, la superficie attiva è pari a circa  $1500 \text{ m}^2$ , i.e. circa 6 campi da tennis!

Il terzo punto ribadisce quanto precedentemente notato: le proprietà della materia nanostrutturata possono essere radicalmente diverse da quelle della materia nello stato "massivo". C'è quindi da chiedersi se esiste un punto di svolta in cui le dimensioni attribuiscono alla materia proprietà non più riconducibili ad un ambito puramente classico.

Per tentare di rispondere a questa domanda, è inevitabile ricondursi al grafene, ovvero al materiale sul quale si concentrano attualmente le maggiori attenzioni della comunità scientifica.

## Il grafene

Il grafene è uno strato monoatomico di atomi di carbonio organizzati secondo una struttura cristallina a celle esagonali (vedi Figura 9). Gli orbitali degli atomi di carbonio sono ibridizzati  $sp^2$  e generano sul singolo piano forti legami di tipo sigma che garantiscono l'alta stabilità meccanica dello strato atomico. Gli orbitali atomici ortogonali al piano atomico formano legami di tipo  $\pi$ , che sono i responsabili delle eccezionali proprietà elettriche del grafene.

La grafite è costituita dall'impilamento di questi strati atomici bidimensionali tenuti insieme da deboli legami interpiano di tipo van der Waals. Per questo la grafite è facilmente sfaldabile in direzione parallela al piano cristallino; è quanto avviene quando si traccia sulla carta un tratto con una matita esfoliando i piani grafenici della mina oppure utilizzando il celeberrimo metodo *del nastro adesivo* descritto in Figura 10 ed adottato da Andre K. Geim e Konstantin Novoselov, premi Nobel per la Fisica 2010. Il problema è che il materiale che rimane sul foglio di carta o sul nastro adesivo mantiene le caratteristiche della grafite "massiva" fino a che il numero di strati atomici si riduce ad 1 o 2 decine [16]. Il merito di questi due scienziati è stato quindi quello di estrarre da quella pletora di fiocchi grafitici esfoliati, quelli contenenti pochi strati atomici, di dimensioni tali da poter essere caratterizzati. Quanto è emerso da questi studi è che le proprietà di n strati grafenici differiscono sensibilmente da quelle di un materiale con (n-1)

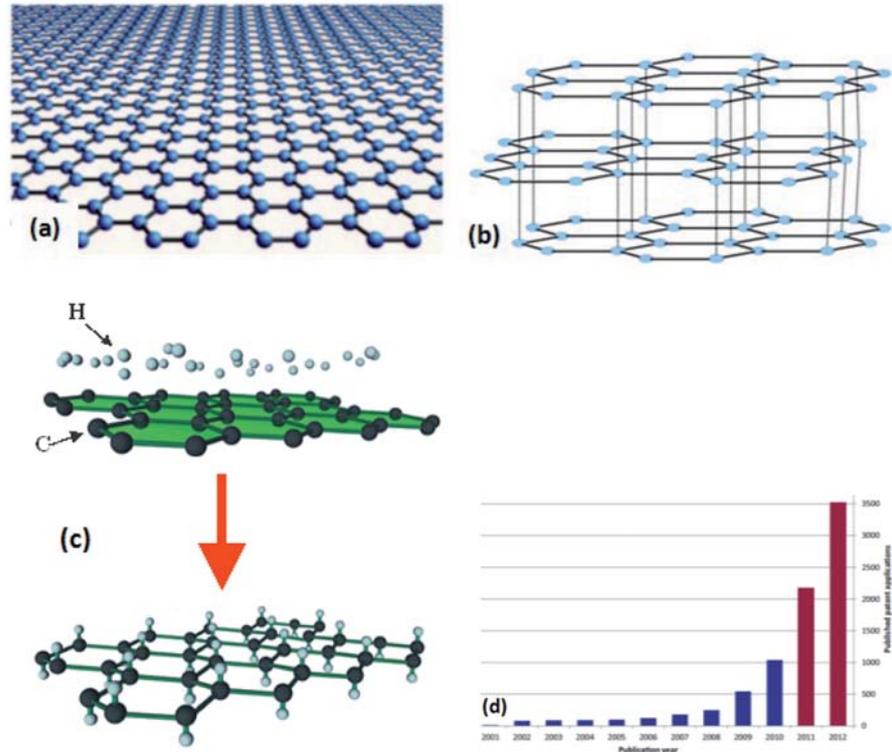


Figura 9. (a) struttura a nido d'api del grafene (estratto da [16]); (b) struttura atomica della grafite ottenuta impilando strati monoatomici grafenici; (c) struttura atomica del graphane ottenuto esponendo un monolayer grafenico ad idrogeno atomico; (d) andamento temporale dei brevetti nel mondo riguardanti lo sviluppo e le applicazioni del grafene.

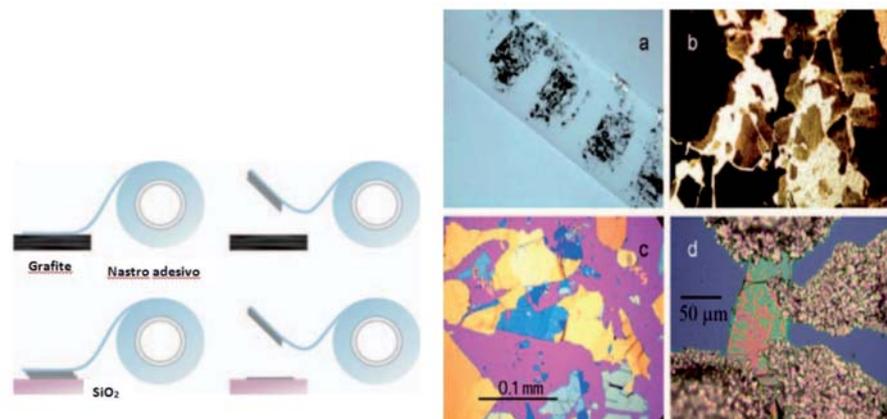


Figura 10. A sinistra: schema del metodo del "nastro adesivo" per la produzione del grafene: il nastro è usato per clivare gli strati grafenici superficiali da un campione massivo di grafite. Il nastro con i residui grafenici è quindi pressato su un substrato di ossido di silicio; alcuni fiocchi di grafene rimangono sul substrato anche a seguito della rimozione del nastro. A destra, (a) sottili cristalli di grafite ottenuti dall'esfoliazione con nastro adesivo di un blocco di grafite pirolitica; (b) alcuni dei cristalli sono otticamente trasparenti ed osservabili con una semplice lente di ingrandimento; (c) se depositati su uno strato di ossido di silicio, i cristalli assumono diverse colorazioni dipendentemente dal loro spessore; (d) uno dei primi dispositivi di grafene realizzato utilizzando pinzette, stuzzicadenti e pasta d'argento conduttiva (estratto da [16]).



strati e tali differenze si amplificano man mano che si riduce il numero di strati. L'esempio limite è costituito dalle diverse proprietà di un doppio (bi-layer) o singolo (mono-layer) strato di grafene:

- a) la resistenza alla trazione del singolo strato è dovuta ai soli legami interatomici di tipo sigma che garantiscono una eccellente resistenza alla trazione; nel bilayer la resistenza è notevolmente minore dato che i due piani atomici possono scorrere l'uno sull'altro;
- b) la reattività chimica del monostrato può avvenire solo se le due superfici sono esposte all'idrogeno (in tal caso il materiale viene detto "graphane"); situazione ovviamente diversa da quanto avviene nel bilayer in cui permangono legami van der Waals fra i due strati atomici;
- c) se esposto ad un campo elettrico, tutti gli elettroni di un monostrato ne risentono. In un bilayer o in un multistrato, l'effetto del campo elettrico è schermato dal primo piano atomico.

In definitiva quindi, due strati grafenici hanno alcune proprietà ancora assimilabili a quelle della grafite, mentre il singolo strato è decisamente qualcosa di diverso. Parafrasando quindi Ebulide di Mileto che nel paradosso del sorite (mucchio) si chiedeva quando un mucchio di sabbia può considerarsi ancora tale se i singoli grani sono rimossi uno per volta, si può affermare che nel caso del grafene *anche un bilayer è così differente dal singolo strato che due grani già possono essere considerati un mucchio* (dalla "lectio magistralis" di A. Geim al conferimento del Premio Nobel [16]).

Vi sono solidi motivi che giustificano i molti superlativi che accompagnano spesso l'elenco delle proprietà del grafene. È il materiale più sottile, ma anche il più resistente alla deformazione elastica (si pensi alle racchette da tennis a base di grafene presenti già oggi nei negozi sportivi); pur avendo una struttura cristallina, il grafene può essere deformato fino al 20% della sua lunghezza.

È un conduttore elettrico eccezionale avendo la più alta mobilità dei portatori, il cui moto può essere considerato "balistico" a distanze dell'ordine della decina di micrometri. Questo significa che dispositivi di queste dimensioni presentano una resistenza elettrica pressoché nulla: una specie di superconduttività a temperatura ambiente!

Malgrado la sua conducibilità, il grafene è un materiale trasparente, dato che assorbe soltanto il 2.3% della luce; tuttavia esso può essere osservato ad occhio nudo se depositato su un film sottile (qualche frazione di micrometro) di ossido di silicio. Può quindi essere utilizzato sia come elettrodo trasparente per celle solari di nuova generazione sia come materiale per "touch-screen".

Essendo un materiale bidimensionale, tutti gli atomi sono potenzialmente reattivi con l'ambiente e quindi, ogni molecola che interagisce con il reticolo ne perturba le proprietà elettriche, rendendo quindi il grafene il materiale ideale per la realizzazione di sensori di gas.

La combinazione di queste proprietà consente una realistica proiezione verso nuove applicazioni: ad esempio è già stata dimostrata la possibilità di "stampare" circuiti elettronici superveloci a base grafene su plastica: la combinazione quindi dell'alta flessibilità, conducibilità elettrica e trasparenza ottica permetterà a breve la produzione su larga scala di elettronica flessibile, i.e. dispositivi elettronici (e.g. telefoni, sensori medici) che si potranno indossare come abiti alimentati da celle fotovoltaiche trasparenti, ovviamente tutto a base di grafene [17].

È quindi chiaro il motivo dell'estremo interesse della comunità scientifica per questo materiale (più di 24000 articoli in riviste scientifiche pubblicati dal 2002),



la ragione per cui il numero dei brevetti è cresciuto esponenzialmente (Figura 9d, [18]) nell'ultimo decennio (fra i più prolifici titolari di brevetti si annoverano giganti industriali quali IBM, Samsung e Xerox), e la motivazione della scelta effettuata dalla Unione Europea per finanziare per i prossimi 10 anni il progetto "GRAPHENE" [19], con un miliardo di euro, con l'obiettivo di *plasmare l'innovazione e il futuro tecnologico del continente*.

### Conclusioni

La manipolazione della materia alla scala del nanometro per lo sviluppo di nuovi materiali e nuovi dispositivi che fino a pochi anni fa potevano essere considerati "fantascientifici", viene usualmente indicata con il termine "nanotecnologia". Non ci sarebbe tuttavia un tale sviluppo tecnologico se non ci fosse un'altra feconda ricerca scientifica ed un continuo scambio bidirezionale fra scienza e tecnologia: la prima fornisce gli strumenti ed i concetti che permettono lo sviluppo di nuove tecniche che a loro volta stimolano la creatività scientifica. Ma in quale tradizionale disciplina scientifica rientra la nano-scienza?

È chiarificatore forse considerare che l'approccio con cui è stato introdotto il grafene (i.e. uno strato monoatomico estratto dall'esfoliazione della grafite) è un tipico approccio top-down, caratteristico dell'ambito fisico. Parimenti, il grafene può essere considerato come l'assemblaggio di infiniti anelli aromatici; questo è un tipico approccio bottom-up concettualmente più contiguo a discipline di tipo chimico. Del resto, che senso può ancora avere la distinzione fra Chimica e Fisica quando si trattano oggetti che si possono ridurre ad un numero misurabile di atomi? E si possono affrontare argomenti riguardanti interazioni dei nanomateriali con organismi viventi senza coinvolgere ambiti tradizionalmente appannaggio delle Scienze Biologiche (ambiti che non riguardano soltanto i bio-nanomateriali, ma anche gli studi sulla tossicità delle nano particelle)? E ancora, come è possibile progettare materiali innovativi senza lo sviluppo di nuovi strumenti matematici anche utilizzando formalismi propri della Fisica Teorica (ad esempio la trattazione delle proprietà elettroniche del grafene secondo il formalismo della elettrodinamica quantistica)?

Si può quindi parlare di una nuova scienza, la Nanoscienza appunto, che necessita di un cambio di prospettiva radicale nel tradizionale modo di affrontare lo studio e la manipolazione della materia, imponendo il superamento delle barriere tra le varie discipline scientifiche. L'interdisciplinarietà è quindi la sfida concettuale che non può essere disattesa se si vuole mantenere il passo alle epocali trasformazioni che ci attendono. È una sfida da cogliere anche nel settore educativo attraverso l'integrazione della Nanoscienza nei curricula scolastici. A tal fine sono da segnalare a livello nazionale il progetto di innovazione didattica NANOLAB promosso dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia [20] e a livello europeo il progetto NANOYOU (Nano for Youth) [21] che la Commissione Europea ha finanziato nell'ambito del settimo programma quadro con lo scopo di *accrescere la conoscenza di base delle nanotecnologie nei giovani e di sollevare il dibattito sui suoi aspetti etici, legali e sociali*.

**Approfondimenti  
bibliografici**

- [1] ZANE, M., *Storia e memoria del personal computer. Il caso italiano*, Editoriale Jaca Book, (2008).
- [2] [http://www3.istat.it/dati/catalogo/20120118\\_00/cap\\_21.pdf](http://www3.istat.it/dati/catalogo/20120118_00/cap_21.pdf).
- [3] NARDUCCI, D., *Cosa sono le nanotecnologie. Istruzioni per l'uso della prossima rivoluzione scientifica*, Sironi Editore, (2008). <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/705881/Moores-law>  
<http://www.singularity.com/charts/page59.html>.
- [4] Nobel prize in Physics 2000 lectures: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2000](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2000).
- [5] <http://www.intel.com>.
- [6] <http://www.treccani.it/enciclopedia/>.
- [7] [http://media.wiley.com/product\\_data/excerpt/53/07803108/0780310853.pdf](http://media.wiley.com/product_data/excerpt/53/07803108/0780310853.pdf).
- [8] M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler, *Science*, Vol. 262 no. 5131, pp. 218-220 (1993) e [http://researcher.ibm.com/researcher/view\\_project.php?id=4245](http://researcher.ibm.com/researcher/view_project.php?id=4245).
- [9] TANS, A.J., DEVORET, M.H., DAI, H., THESS, A., SMALLEY, R.E., GEERLIGS, L.J., DEKKER, C., *Nature* 386, 474 - 477 (1997).
- [10] ZHENG, J., ZHANG, C., DICKSON, R.M., *Physical Review Letters*, 93, 077402-1 (2004). <http://gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/quantumdot.pdf>.
- [11] <https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2003/elect-semi-sensors/quantum.html>.  
<http://www.qdvision.com/release-05052009>
- [12] <http://nanocluster.mit.edu/research.php>; vedi anche R. Girija Aswathy, Y. Yoshida, T. Maekawa, D. Sakthi Kumar, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 397,4, 1417, (2010).
- [13] <http://discovernano.org/whatis/History/HistoryPopup/> ;  
[http://www.nytimes.com/2005/02/22/science/22nano.html?\\_r=0#](http://www.nytimes.com/2005/02/22/science/22nano.html?_r=0#).
- [14] PACCHIONI, G., *Quanto è piccolo il mondo. Sorprese e speranze dalle nanotecnologie*, Zanichelli Editore, 2008.
- [15] MAZZOLDI, P., MATTEI, G., *Introduzione alle Nanotecnologie e ai Nanosistemi*.
- [16] Nobel prize in Physics 2010 lectures: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2010/intervista\\_a\\_Kostantin\\_Novoselov\\_di\\_Piergiorgio\\_Odifreddi](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/intervista_a_Kostantin_Novoselov_di_Piergiorgio_Odifreddi) <http://www.piergiorgio-odifreddi.it/wp-content/uploads/2010/09/novoselov.pdf>
- [17] Fra i numerosi siti WEB di carattere divulgativo sul grafene, si segnala il sito della BBC: <http://www.bbc.co.uk/search/?q=graphene>
- [18] <http://www.ipo.gov.uk/informatics-graphene-2013.pdf>;
- [19] <http://www.graphene-flagship.eu/>
- [20] <http://www.nanolab.unimore.it/>
- [21] <http://nanoyou.eu/>