

Nano-scienza e nano-tecnologia: nuove frontiere della scienza.

Paolo Vavassori

*CNR-INFM National Research Center on nanoStructures and
bioSystems at Surfaces (S3), Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara.
CIC nanoGUNE Consolider Research Centre, San Sebastian, Spain*



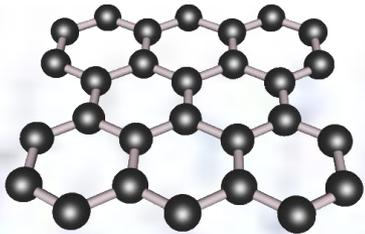
Università degli studi di Ferrara
Dipartimento di Fisica

What IS Nanoscience?

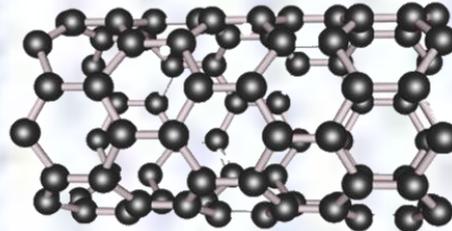
*When people talk about Nanoscience, they start by describing **things***

Physicists and Material Scientists point to **things** like new nanocarbon materials:

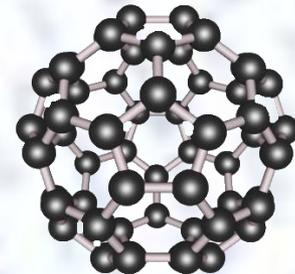
They effuse about nanocarbon's strength and electrical properties



Graphene



Carbon Nanotube



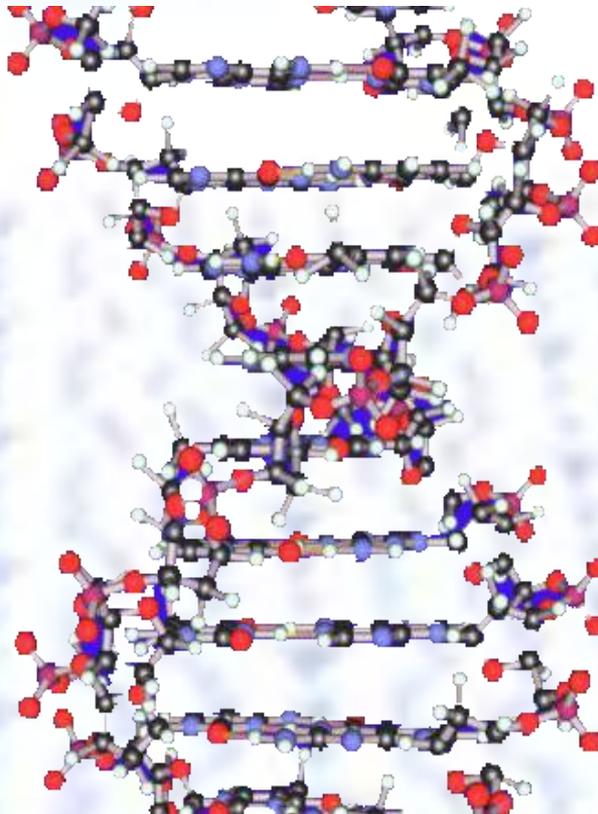
C60 Buckminster Fullerene

What IS Nanoscience?

Biologists counter that nanocarbon is a recent discovery

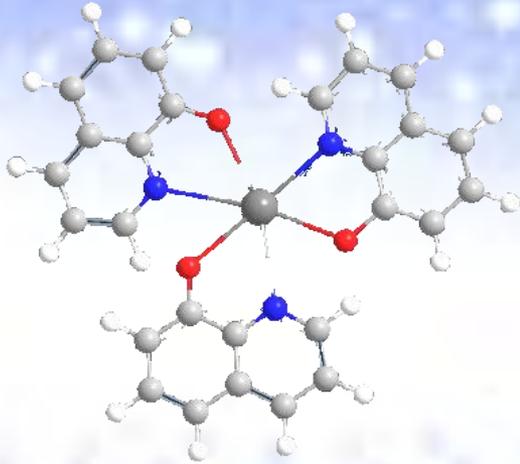
THEY'VE been studying DNA and RNA for *much* longer

(And are *already* using it to transform our world)



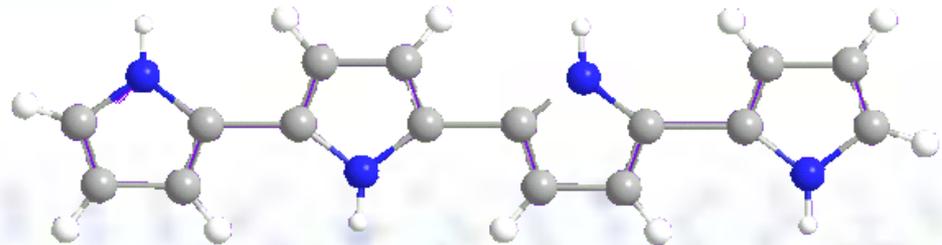
What IS Nanoscience?

Chemists respond: THEY'VE been synthesizing molecules for over a century!

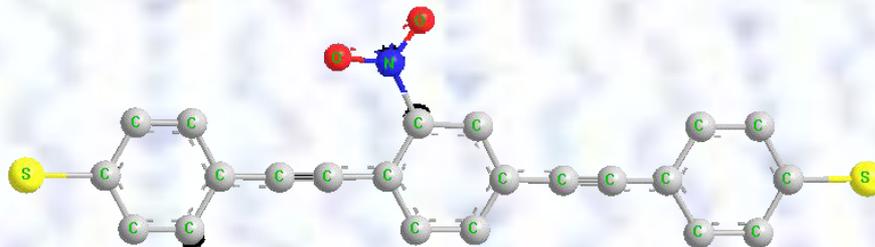


<= First OLED material: tris 8-hydroxyquinoline aluminum

(OLED = organic light emitting diode)



Commercial OLED material: Polypyrrole



Most heavily investigated molecular electronic switch: Nitro oligo phenylene ethynylene

All of these things ARE very small

Indeed, they are all about the size of a nanometer:

$$\text{Nano} = 10^{-9} = 1 / 1,000,000,000 = 1 / \text{Billion}$$

A nanometer is about the size of ten atoms in a row

This leads to ONE commonly used definition of nanoscience:

Nanoscience is the study of nanometer size things (?)

Why the question mark? Because what is so special about a nanometer?

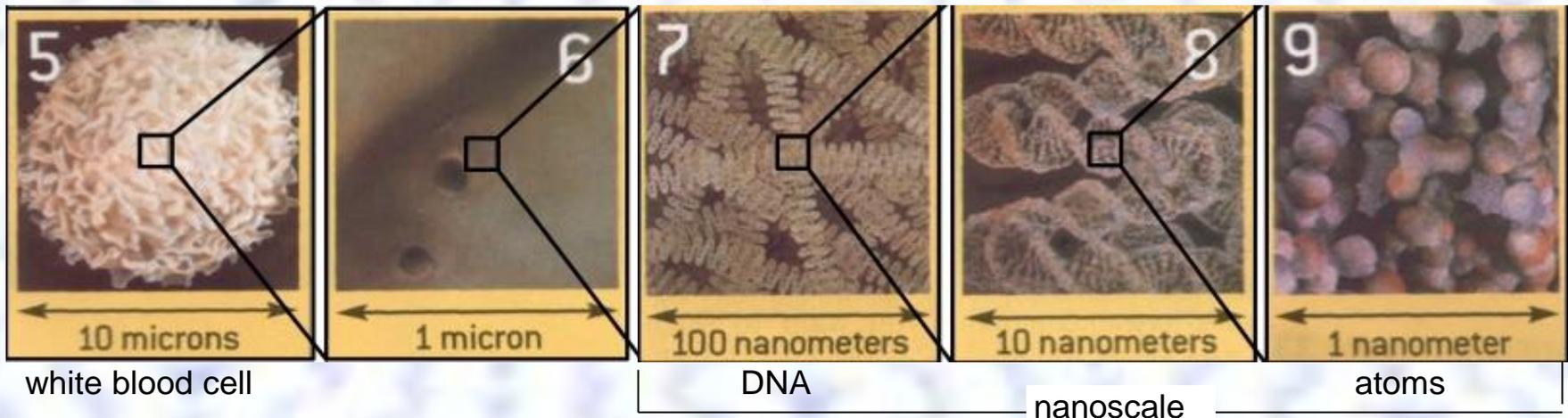
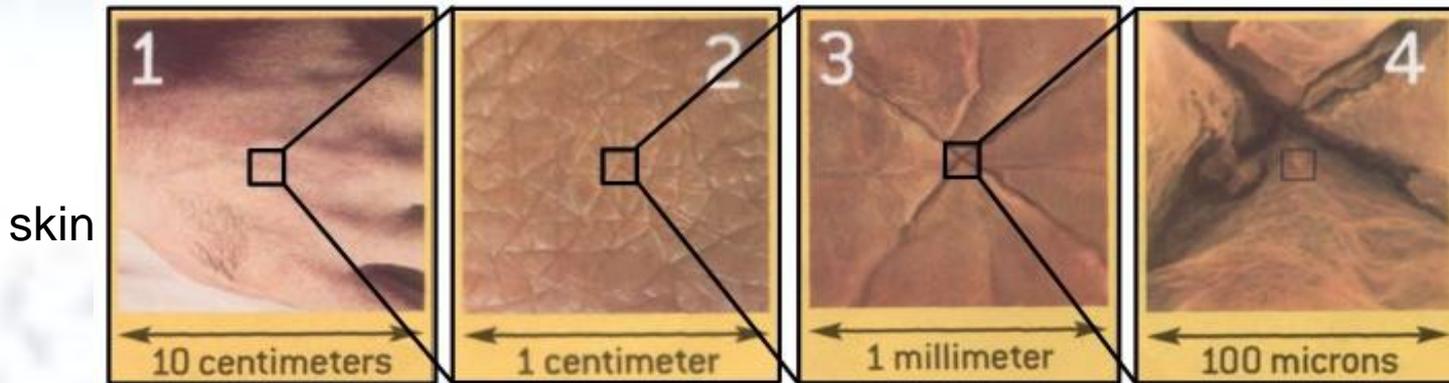
A micrometer is ALSO awfully small:

$$\text{Micro} = 10^{-6} = 1 / 1,000,000 = 1 / \text{Million}$$

A micrometer (or "micron") is ~ the size of light's wavelength

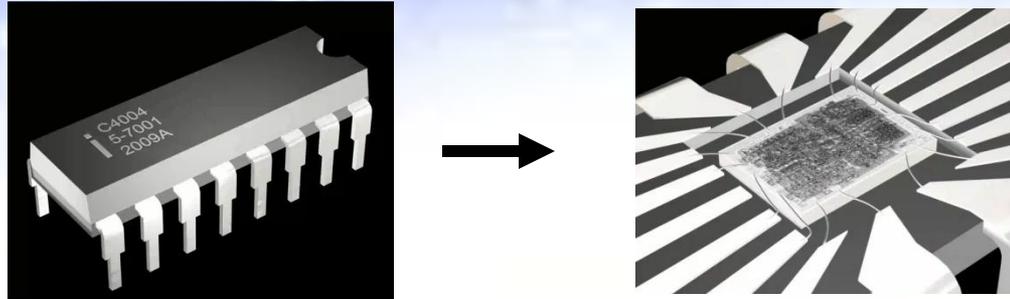
How Big is a Nanometer?

- Consider a human hand



And microtechnology has been rolling along for almost half a century!

Microelectronics = Integrated circuits, PC's, iPods, iPhones . . .



Intel 4004: The original "computer on a chip" - 1971 (Source: UVA Virtual Lab)

MEMS (Micro-electro-mechanical-systems):
Air bag accelerometers, micro-mirror TVs & projectors . . .



(Source: Texas Instruments DLP demo - www.dlp.com/tech/what.aspx)

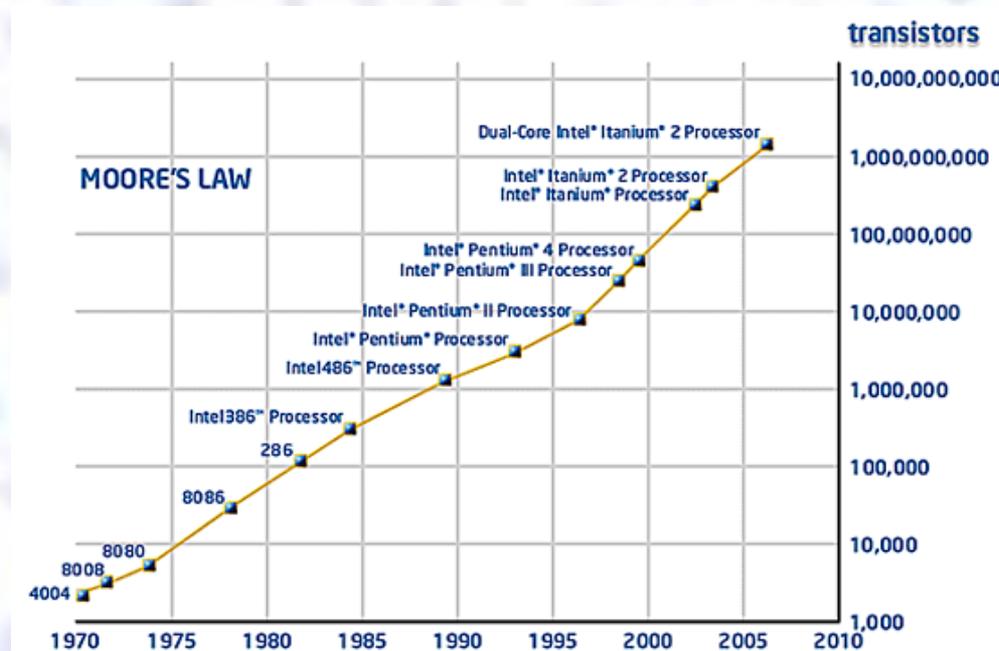
Indeed, microtechnology has gotten smaller EVERY year

MOORE'S LAW: The (then almost whimsical) 1965 observation by Intel co-founder Gordon Moore that the transistor count for integrated circuits seemed to be doubling every 18-24 months

He was *really* sticking his neck out: *IC's had only been invented 7 years before!*

(by Moore, his Fairchild/Intel colleagues, and Texas Instrument's Jack Kilby)

But his "law" has since been followed for forty years:



But then is Nanoscience/technology Really New & Unique?

Micro is also VERY small

Micro has been around for a long time

Micro has steadily shrunk to the point that it is now almost NANO anyway !

There IS a lot of confusion about the distinction between Micro & Nano

Even among scientists!!

And it is pretty certain that Nanotechnology will be built UPON Microtechnology

Either by using certain Microfabrication techniques

Or, literally, by being assembled ATOP Microstructures

So is this class about Nano OR is it about Micro + Nano?

Given the confusion in the literature, it is almost impossible NOT to discuss both!

HOWEVER based on on my experience (as both nano researcher and teacher):

There IS a clear dividing line between MicroSCIENCE & NanoSCIENCE

There IS also a clear dividing line between MicroTECHNOLOGY &
NanoTECHNOLOGY

***And BOTH dividing lines have to do with the
wavelength of waves!!***

At least when talking of electrons

What are the relevant length scales for nano?

Well, I guess it depends on who you talk to.

One useful perspective on a definition for the appropriate length scales for nano is a regime where the chemical, physical, optical and electrical properties of matter all become size and shape dependent.

Dividing Line #1:

ELECTRON WAVES Separate NanoSCIENCE from MicroSCIENCE

The discovery that electrons = waves led to QUANTUM MECHANICS

A weird, new, counter intuitive, non-Newtonian way of looking at the nano world

With a particular impact upon our understanding of electrons: Electrons => Waves

How do you figure out an electron's wavelength?

$$\lambda_{\text{electron}} = h / p \quad \text{“De Broglie’s Relationship”}$$

(λ = electron wavelength, h = Planck's Constant, p = electron's momentum)

This relationship was based on series of experiments late 1800's / early 1900's

To put the size of an electron's wavelength in perspective:

Size of *Things* (orange = man-made things)

	Millimeters	Microns	Nanometers
Ball of a ball point pen	0.5		
Thickness of paper	0.1	100	
Human hair	0.02 - 0.2	20 – 200	
Talcum Powder		40	
Fiberglass fibers		10	
Carbon fiber		5	
Human red blood cell		4 – 6	
E-coli bacterium		1	
Size of a modern transistor		0.25	250
Size of Smallpox virus		0.2 – 0.3	200 – 300

Electron wavelength: ~10 nm or less

Diameter of Carbon Nanotube	3
Diameter of DNA spiral	2
Diameter of C60 Buckyball	0.7
Diameter of Benzene ring	0.28
Size of one Atom	~0.1

Below that line = Nanoscience!

It's NOT just about the metric units we prefer to use when measuring *things*

Things above that line are still often measured using nanometers

It IS about the SCIENCE (QM) => Electrons are mushy clouds of size $\sim \lambda_{\text{De Broglie}}$

Above that line, clouds seem small: Electrons \sim hard B-B like dots

Below that line, mushy cloudiness of electrons becomes very important

Controls electrical, optical, mechanical and other properties

Controls bonding and nanostructure

The Science Changes! Microscience \neq Nanoscience

Or putting it into more human terms

Above that line:

It is still the sensible world of Sir Isaac Newton (and his physical laws)

It is still the world WE commonly experience

Even though we DO need microscopes to see its smaller things

And even if those smaller things seem unduly influenced by:

Water tension, static charge . . . (things we largely ignore)

Below that line:

The rules of Quantum Mechanics => Mushy electron waves take over

And our (Newtonian) instincts and assumptions are frequently dead wrong!

... I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics...

- Richard Feynman

LIGHT WAVES Separate NanoTECHNOLOGY from MicroTECHNOLOGY

Technology = The things we make and how we make them

As opposed to the underlying science dictating how they act

Where does light's wavelength enter into technology?

Micro technology is based on the use of light

How? Light is used for PHOTOENGRAVING:

Use of light images to pattern metal parts =>



Micro projection of light images = Way we make the billions of transistors in the integrated circuits of our PCs, iPods . . .

(a.k.a. "Microfabrication")

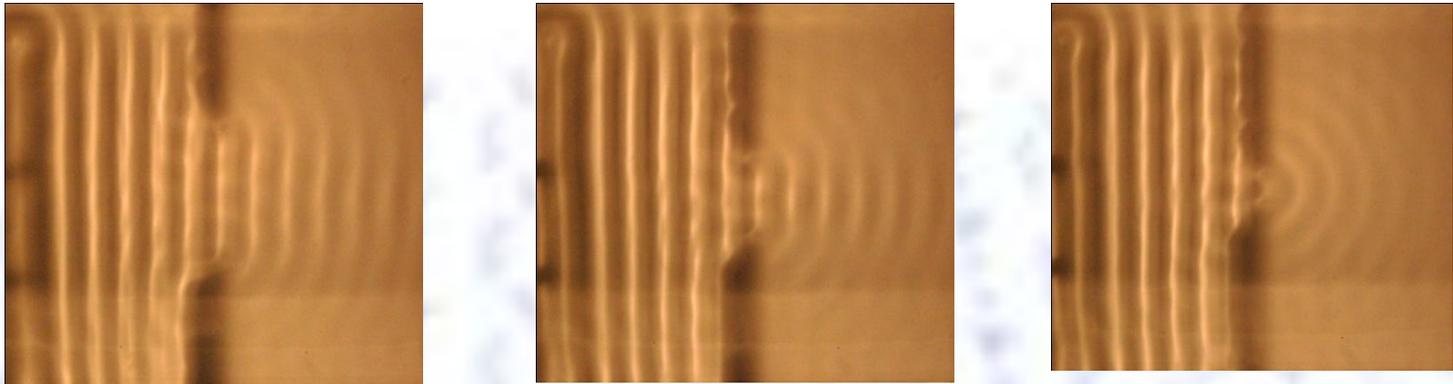
But HOW does Light Wavelength affect Technology?

Micro-photoengraving (photolithography) confines projected light to small beams

Can “confine” by focusing light with a lens

Can “confine” by passing light through holes / shadow masks

But you cannot confine a wave into a beam narrower than its wavelength



Shadow images of water waves, from left, passing thru gap in barrier

OK, but what is light's wavelength?

Size of *Things*

(orange = man-made things)

Millimeters

Microns

Nanometers

Ball of a ball point pen

0.5

Thickness of paper

0.1

100

Human hair

0.02 - 0.2

20 – 200

Talcum Powder

40

Fiberglass fibers

10

Carbon fiber

5

Human red blood cell

4 – 6

E-coli bacterium

1

1000

Visible Light Wavelength:

0.40 – 0.75 microns

400 – 750 nm

Size of a modern transistor

0.25

250

Size of Smallpox virus

0.2 – 0.3

200 – 300

Electron wavelength: Upper upper limit ~ 10 nm

Diameter of Carbon Nanotube

3

Diameter of DNA spiral

2

Diameter of C60 Buckyball

0.7

Diameter of Benzene ring

0.28

Size of one Atom

~0.1

Above the new (upper) line:

We can still use light-based “Microfabrication” techniques

And even though they were developed for electronics,

they are now also applied to making all sorts of micro things!

Below that new line:

NO longer able to use Microfabrication

Replacement would be called “Nanofabrication” or “Nanotechnology”

But we don't yet really know **WHAT** that replacement will be!

Why Nanoscience research is now such a mix of different techniques

Recurring theme: Hope we can get nano things to *ASSEMBLE THEMSELVES* (!!!)

To recap:

There IS a fundamental change in SCIENCE below about 10 nanometers:

Newton is out the window. Quantum Mechanics is in.

Hard sensible objects are replaced by squishy electron waves / clouds

Intuition, based on our life experience => fundamentally flawed

There IS a fundamental change in TECHNOLOGY below 100 nanometers:

Light will not focus this small

Light image based fabrication ceases to work

Need something new (“Nanotechnology”) - Still being defined!!!

So NANO it is NOT just THINGS measured in units of nanometers!!!

Nano Is:

When the rules change!

And ALL nano-scientists must deal with quantum mechanics (not just physicists)

Where we need a whole new (still largely unknown) bag of tricks:

MAKING nano things is the *easy* part

ASSEMBLING masses of them into useful things is the *hard* part

Our HOPE is to get nano things to SELF-ASSEMBLE

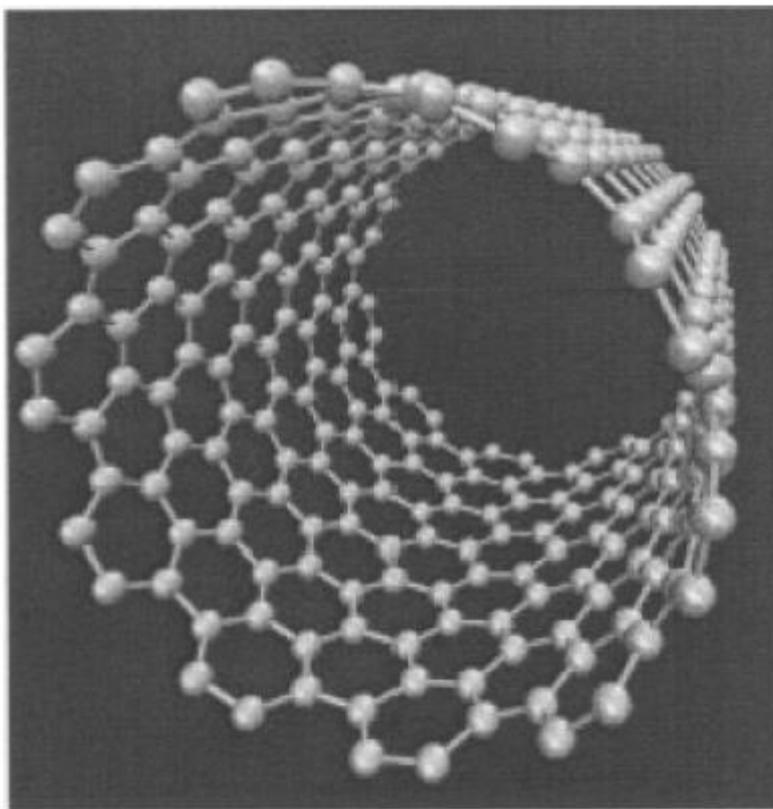
Leading us to look at how nature does this (chemical and bio self-assembly)

=> Nano's incredibly broad range of science and technology:

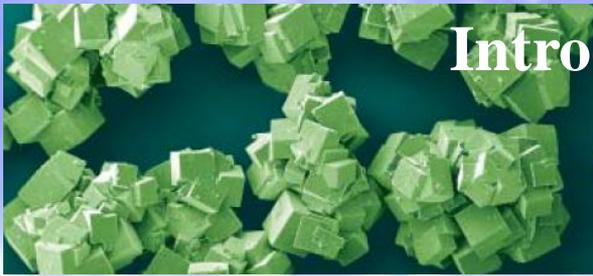
Physicists + Chemists + Biologists + Electrical Engineers + Materials Scientists + . . .

A range of disciplines which have never before collaborated so massively!!

Nano-tecnologia



Introduzione



Che cosa sono le nanotecnologie

Viaggio nel nanocosmo



La nanotecnologia nella natura

Strumenti e processi



Occhi per il nanocosmo

Progettazione di materiali su scala nanometrica

Le nanotecnologie al servizio della società`

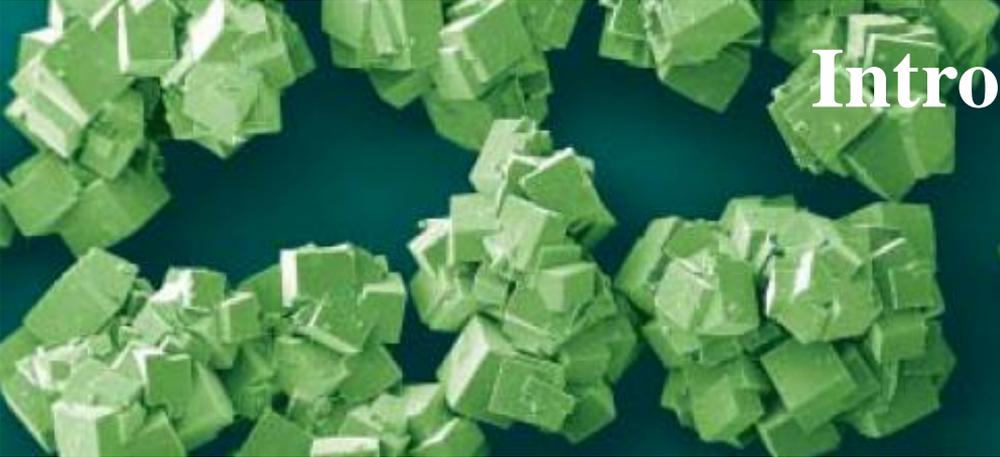
Nanomeccanica e Nanoelettronica

Energia e ambiente

Mobilità`

Settore sanitario

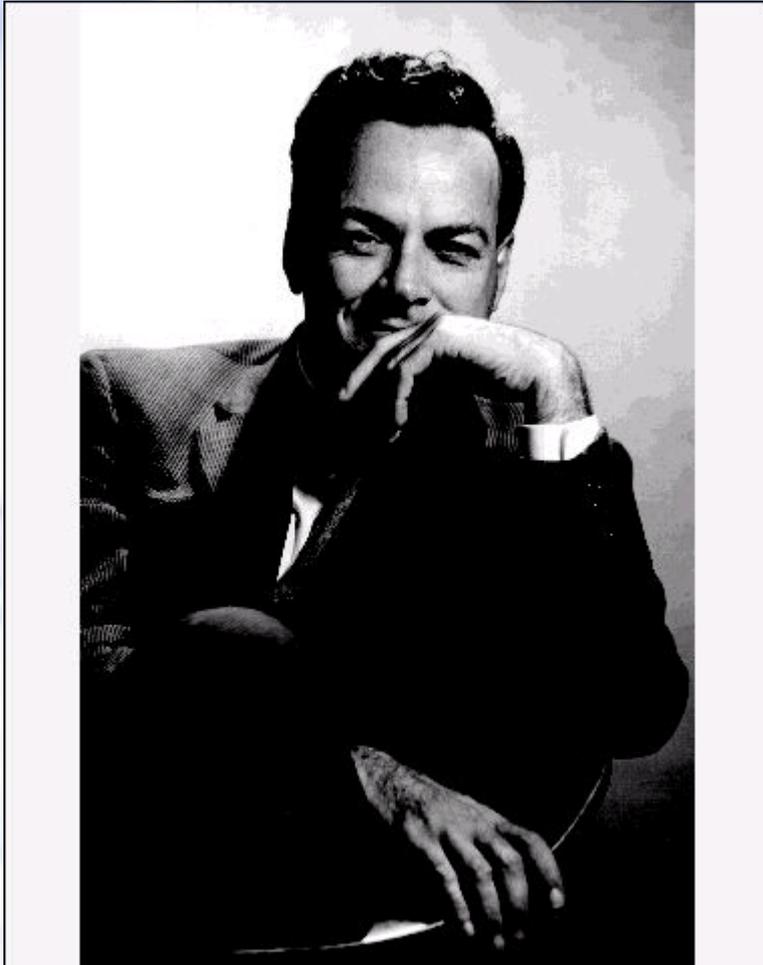


A scanning electron micrograph (SEM) showing numerous small, green, faceted nanocrystals. The crystals are roughly cubic or hexagonal in shape and are clustered together. The background is dark, making the green crystals stand out.

Introduzione

Che cosa sono le nanotecnologie

“L’inventore” della nanoscienza

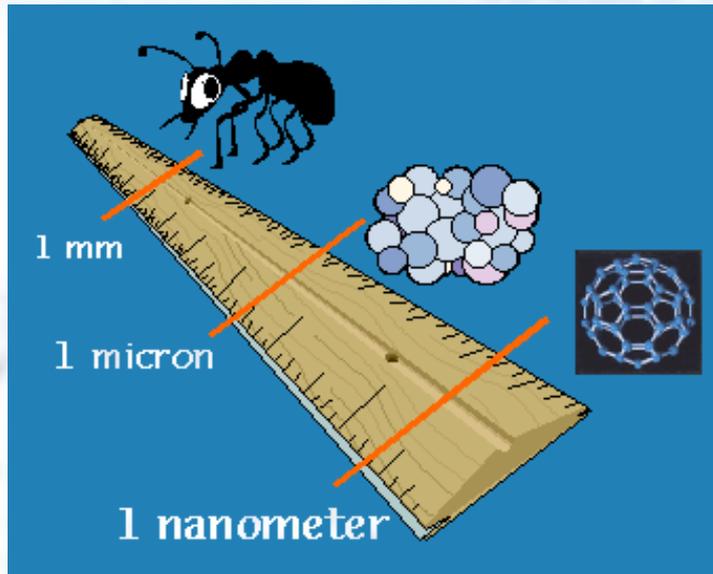


© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

In un celebre e profetico discorso nel 1959 al Caltech Richard Feynman (Nobel '65, Fisica) intitolato "There is plenty of room at the bottom" di fatto diede inizio alla ricerca mondiale nel campo della nanoscienza

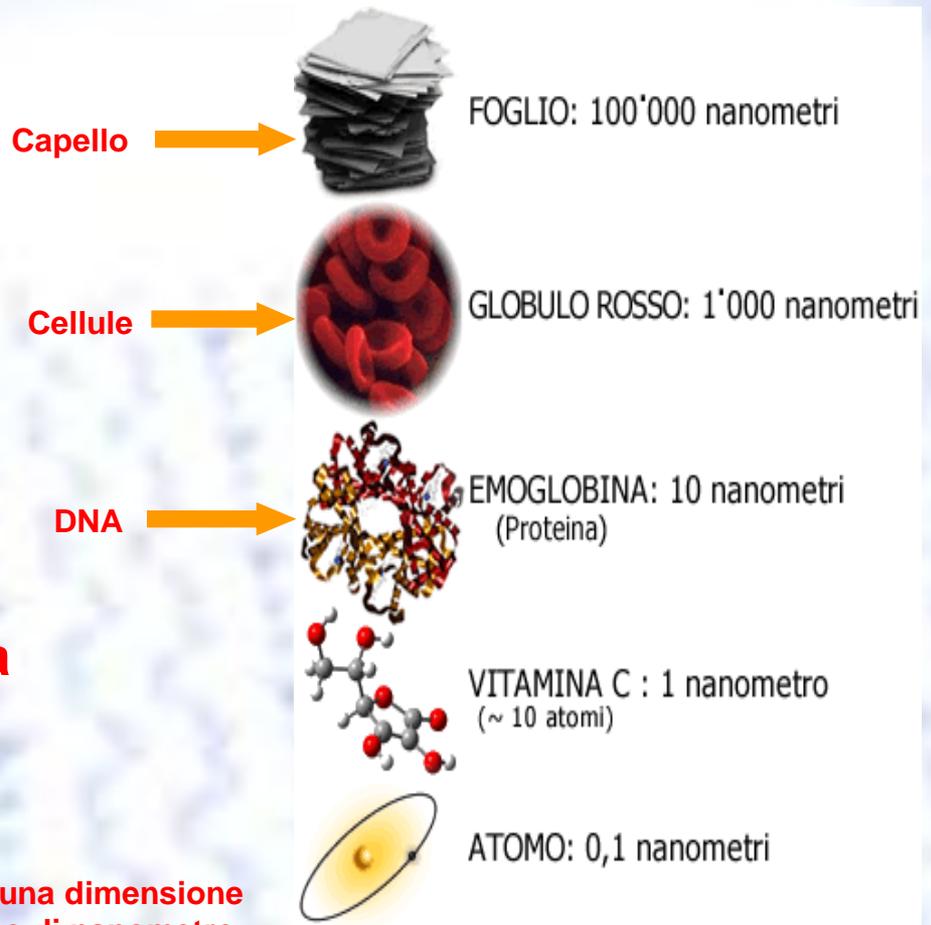
Nano? Capiamo le dimensioni

Il prefisso “nano” significa 10^{-9} , così un nanometro è un miliardesimo di metro.



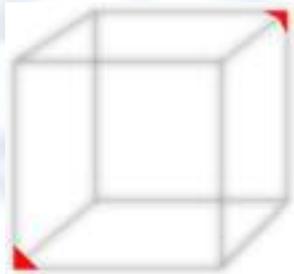
Dunque la **NANOSCIENZA** riguarda lo studio di oggetti di dimensione fra il nanometro e le centinaia di nanometri.

Gli atomi hanno una dimensione Pari ad un decimo di nanometro



Comportamento “diverso” della materia

- ❖ Il comportamento della materia a livello nanometrico non può essere previsto in base alle nostre conoscenze a livello macroscopico
- ❖ Non si tratta solamente di una riduzione di dimensione ma dell'insorgere di fenomeni intrinseci alla nanoscala.
- ❖ Effetti quantistici (comportamento ondulatorio della materia, effetto tunnel)
- ❖ Dominio dei fenomeni di superficie e interfaccia



a

Superficie del cubo = $6 a^2$

Volume del cubo = a^3

Rapporto superficie/volume = $6/a$

- What's interesting about the nanoscale?
 - Nanosized particles exhibit different properties than larger particles of the same substance
- As we study phenomena at this scale we...
 - Learn more about the nature of matter
 - Develop new theories
 - Discover new questions and answers in many areas, including health care, energy, and technology
 - Figure out how to make new products and technologies that can improve people's lives

What is Nanoscale Science?

An emerging, interdisciplinary science

involving

Physics

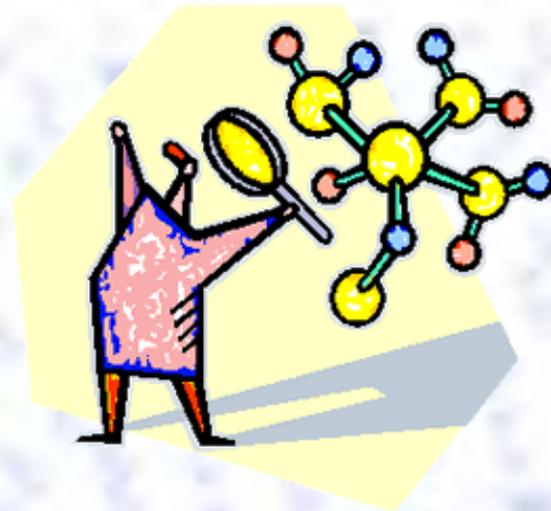
Chemistry

Biology

Engineering

Materials Science

Computer Science



Traditional disciplines

Dealing with Atoms:

- Physics/Material Science:
 - Interests: Understanding how electrons and atomic cores interact
 - Geometries/Conditions: typically large in equilibrium
- Chemistry:
 - Interests: Combining atoms to molecules to create new functionalities
 - Geometries/Conditions: typically large number of molecules of the same kind
- Biology:
 - Interests: Empirical understanding of macro-molecules
 - Geometries/Conditions: very large molecules in solutions

Making Things Small

- Electrical Engineering / Mechanical Engineering
 - Interests: small, fast, and no-so-hot computers
 - Geometries/Conditions: tens of nanometer large, far-from-equilibrium

Dealing with Discrete Bits of Information

- Computer Science / Computer Engineering
 - Interests: How can information be encoded, processed, and transmitted
 - Conditions: Algorithms

How do the disciplines meet?

Computer Science/Engineering:
New Information
Representations!

Mechanical Engineers:
A small Resonator!

Electrical Engineers:
A small transistor device!

Physicists:
Observable
quantum effects!

Man-made structures
with nanometer dimensions
=> ~100,000-1M Atoms

Biology:
Sensing at the
bio-scale!

Chemists:
A very large molecule!!

Material Scientists:
A new material!

One Grand Challenge:

Engineering systems at the nanoscale - Can we model/simulate and build?

- Interests: Assemble nano-scale elements to artificial systems composed with new function
- Conditions: in non-equilibrium, experimental exploration simplified by simulation?

A che punto siamo con la ricerca?

- ❖ Nella corsa mondiale alle nanotecnologie si stanno facendo enormi passi avanti. L'Europa ha rapidamente realizzato investimenti in molti programmi di nanoscienze che hanno preso il via tra la metà e la fine degli anni '90.
- ❖ Ha così sviluppato una solida base di conoscenze e adesso deve fare in modo che l'industria e la società europee possano coglierne i frutti sviluppando prodotti e processi innovativi.

Cosa si intende per nanotecnologie?

Le **nanotecnologie** sono l'insieme di metodi e tecniche per la **manipolazione** della materia su scala atomica e molecolare e hanno l'obiettivo di costruire materiali e prodotti con speciali e superiori caratteristiche chimico-fisiche

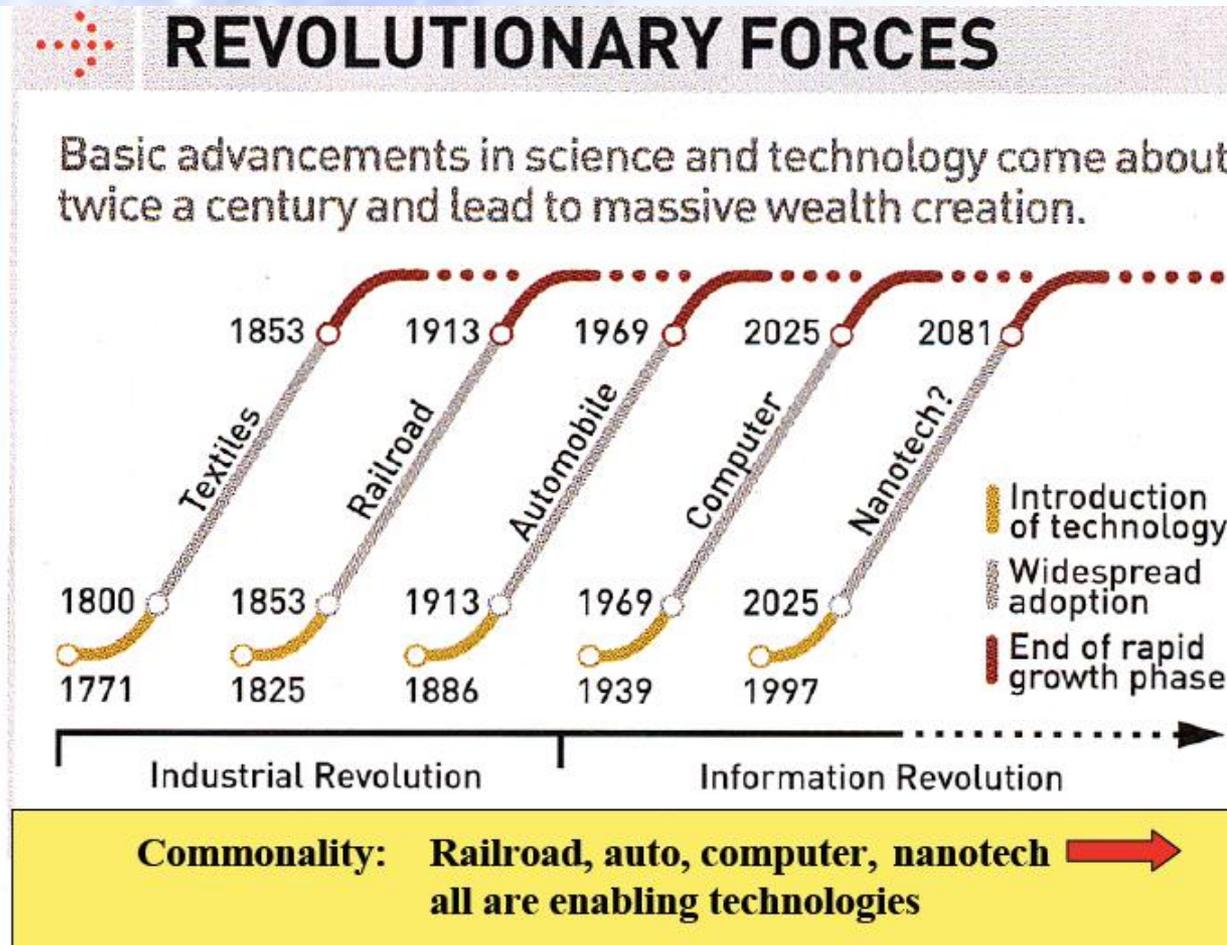
❖ **Tecnologie alternative**

- ❖ Sostituiscono precedenti tecnologie sia attraverso prodotti e processi radicalmente nuovi che rendendo altamente efficienti processi già noti

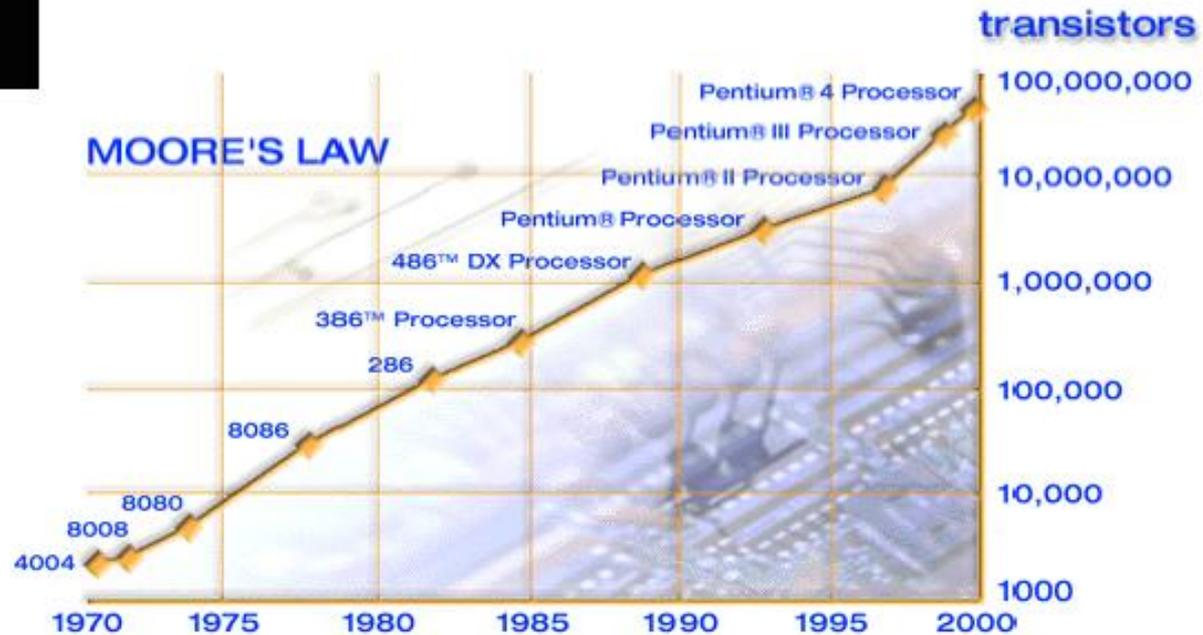
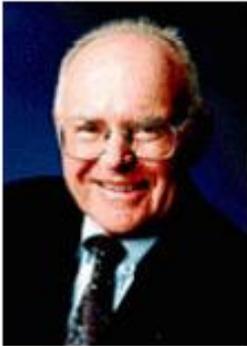
❖ **Tecnologie interdisciplinari**

- ❖ Portano a lavorare insieme ricercatori di settori scientifici tradizionalmente separati favorendo la nascita di nuove idee attraverso la fertilizzazione incrociata

There is a LOT of good Nanoscience, but not yet much in the way of viable Nanotechnology!



Information technology



Information technology

Lesson from Information Revolution

1. It's always better to use less space for energy for every bit of information.
2. The technology to miniaturize devices has led to information revolution in last century.
3. Nanotechnology may lead to another round of information revolution.

Viaggio nel nanocosmo

La nanotecnologia nella natura

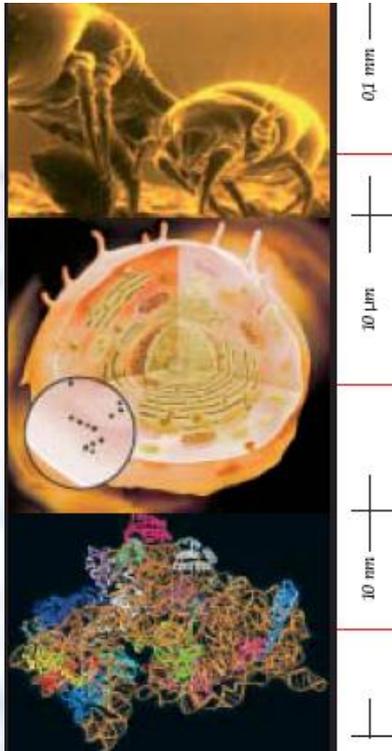


Da dove scaturiscono le nanotecnologie naturali e perché interessano molto ai nanotecnologi?

I solidi sono composti da atomi, disposti in un ordine preciso. La ragione di tale regolarità è semplice: la materia si facilita il più possibile la vita e disporsi secondo una struttura ordinata è la soluzione più comoda.



Sotto l'impulso di **forze autorganizzatrici** la materia sulla Terra ha assunto, nel corso di miliardi di anni, forme eccezionalmente complesse e dotate di vita.

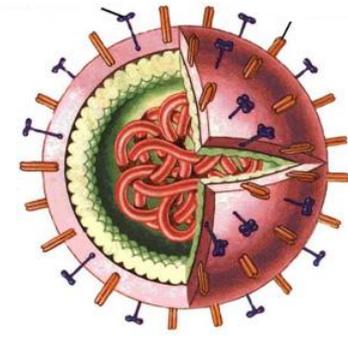
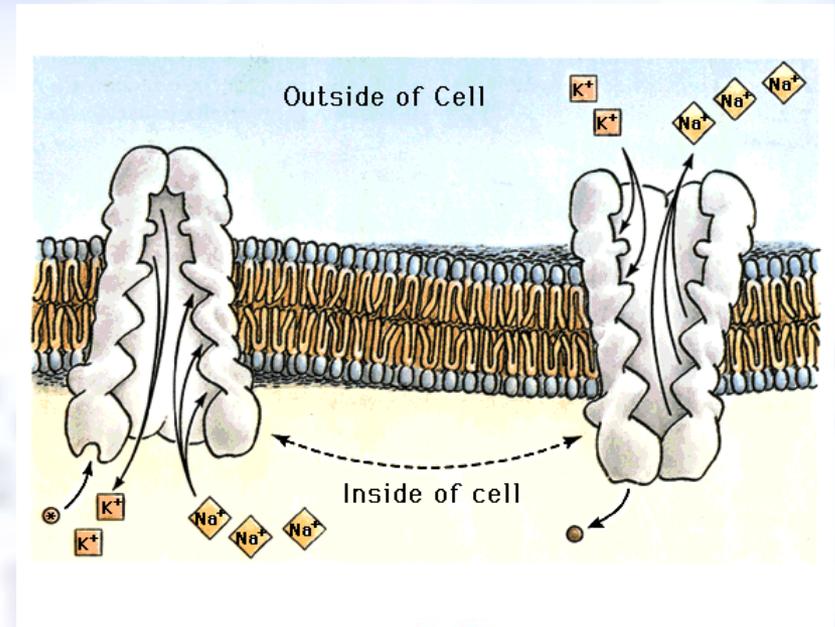


La natura ha trovato soluzioni a volte sorprendenti ai suoi problemi. Una caratteristica frequente è la capacità della materia vivente di autostrutturarsi fino al livello più fine, e cioè al livello degli atomi.

Ed è precisamente quello che vogliono fare anche i nanotecnologi.

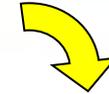
Biological Nanomachines in Nature

- Life begins at the nanoscale
 - Ion pumps move potassium ions into and sodium ions out of a cell
 - Ribosomes translate RNA sequences into proteins
 - Viruses infect cells in biological organisms and reproduce in the host cell



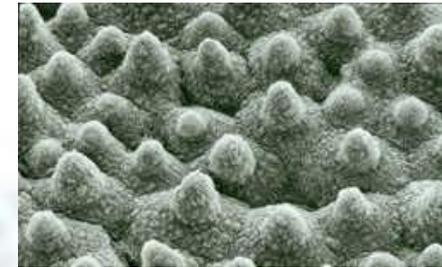
Influenza virus

Effetto Loto



Il Loto mantiene pulite le sue foglie grazie all'effetto "loto". Il microscopio elettronico a scansione ESEM ci mostra che questo fenomeno è dovuto alla superficie rugosa (su scala nanometrica) delle foglie che fa rapidamente scivolare via l'acqua ma anche la sporcizia.

L'effetto loto, studiato approfonditamente all'università di Bonn – è già stato utilizzato in una gamma di prodotti, come le pitture per esterni su cui l'acqua scivola via portando con sé lo sporco e tessuti impermeabili.

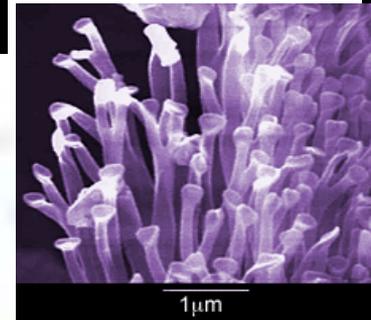
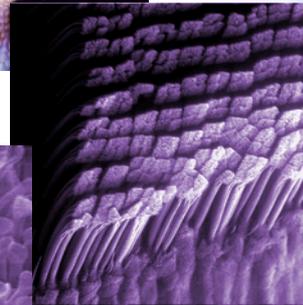


Tessuto a effetto loto realizzato dalla BASF

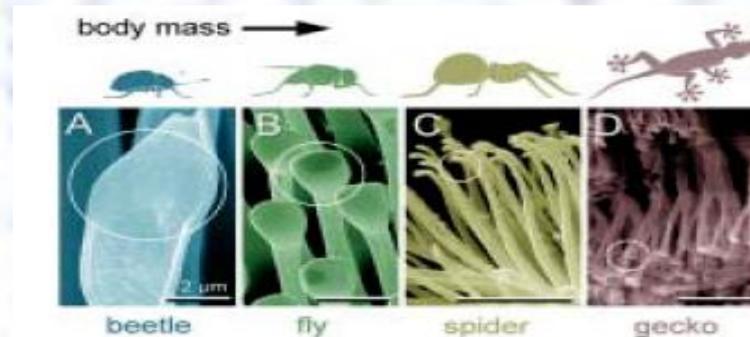
Tecniche nanotecnologiche di aderenza in natura

I gechi possono arrampicarsi sui muri, correre a testa in giù sul soffitto. Naturalmente, riescono a fare tutto questo grazie alla nanotecnologia. I loro polpastrelli sono ricoperti di peli finissimi che possono avvicinarsi a qualche nanometro dal supporto.

A quel punto entra in gioco il cosiddetto legame di **Van der Waals**, una forza debolissima ma che moltiplicata per i milioni di punti di aderenza sostiene il peso del gecko. Il legame si scioglie facilmente per “spellatura”, nello stesso modo in cui si stacca un nastro adesivo. Il gecko riesce così a correre sul soffitto.



La stessa nanotecnologia è utilizzata da scarafaggi, mosche e ragni.



Più l'animale pesa, più sottili e numerosi sono i peli.

Le meraviglie della biomineralizzazione

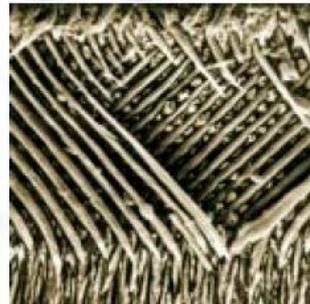
La madreperla è composta da innumerevoli minuscoli cristalli di calcite che di per sé sono estremamente fragili, tenuti insieme da proteine molto elastiche tali da rendere la conchiglia tremila volte più solida di un cristallo di calcite pura.

I ricci di mare usano questa tecnica per rafforzare le loro spine (lunghe 30 cm) in modo che resistano al moto ondoso.



Il cesto di Venere è un capolavoro della Biomineralizzazione.

La struttura di questa spugna è in grado di resistere a forti variazioni di pressione.



**Biomineralizzazione tecnica :
le nanoparticelle riparano i denti.**

Se i denti sono molto sensibili al freddo o all'acidità, di norma è perché i tubuli dentinali, piccoli canali nella corona del dente, rimangono esposti.

Questi canali si otturano dieci volte più rapidamente con le nanoparticelle di fosfato di calcio e di proteine messe a punto dalla ditta SusTech che non con i preparati classici.

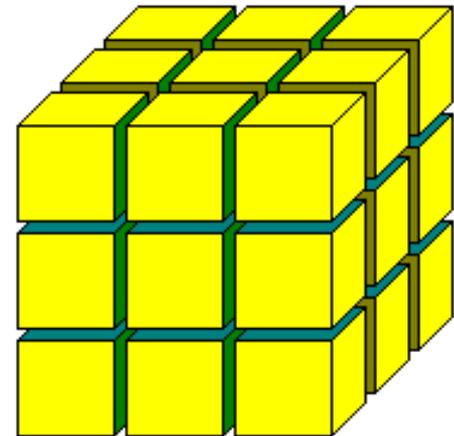
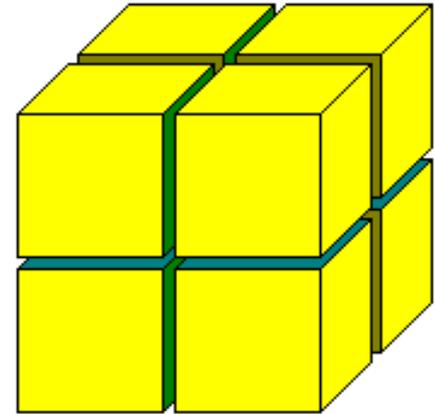
Lo strato di materiale remineralizzato nella bocca si comporta come materiale dentale naturale.

Nanostructures

What kind of nanostructures can we make?

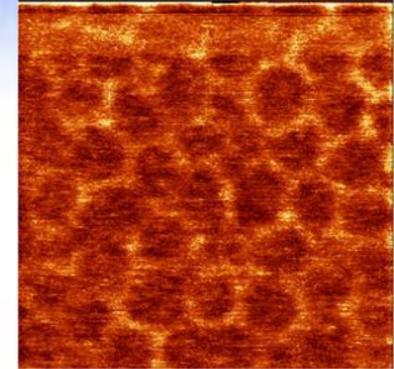
Is Gold Always “Gold”?

- Cutting down a cube of gold
 - If you have a cube of pure gold and cut it, what color would the pieces be?
 - Now you cut those pieces. What color will each of the pieces be?
 - If you keep doing this - cutting each block in half - will the pieces of gold always look “gold”?



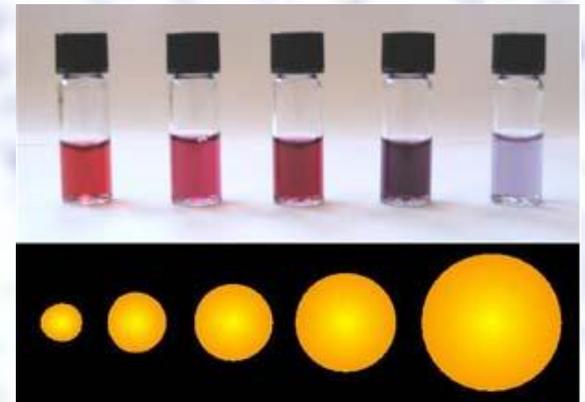
Nanogold

- Well... strange things happen at the small scale
 - If you keep cutting until the gold pieces are in the nanoscale range, they don't look gold anymore... They look **RED!**
 - In fact, depending on size, they can turn red, blue, yellow, and other colors
- Why?
 - Different thicknesses of materials reflect and absorb light differently



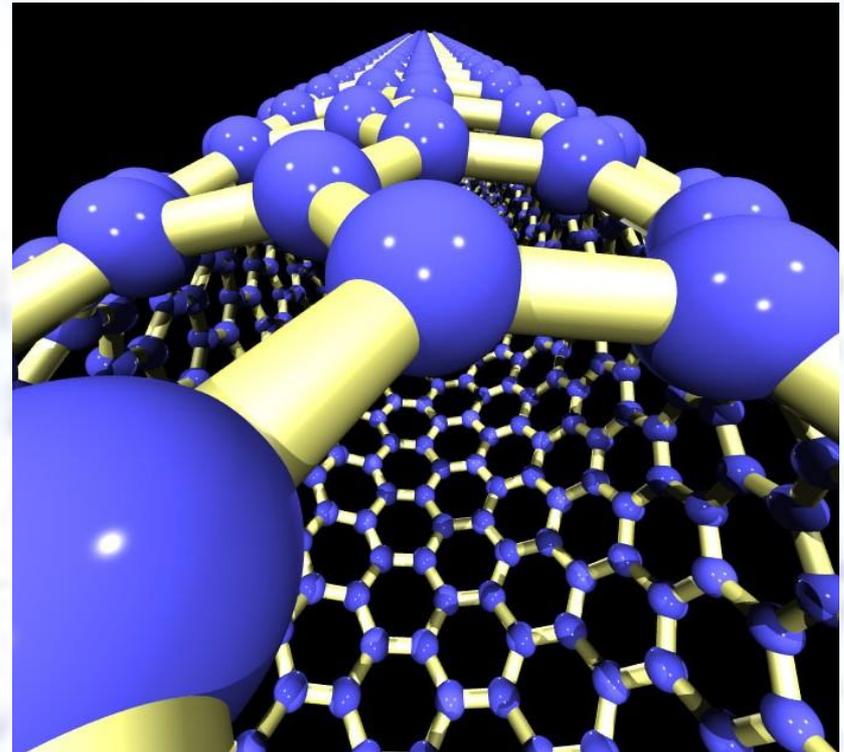
12 nm gold particles look red

Other sizes are other colors



Carbon Nanotubes

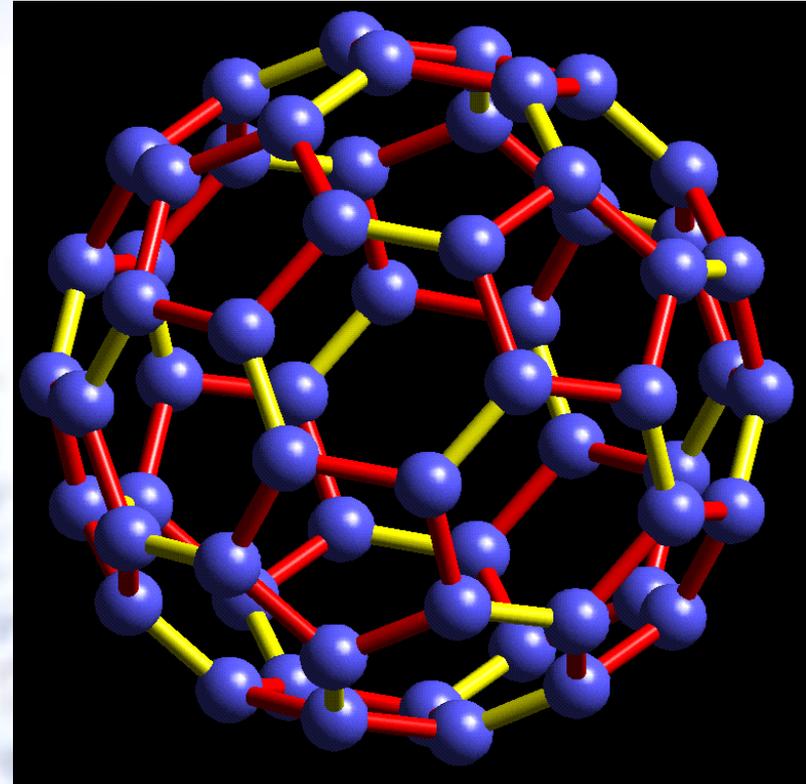
- Using new techniques, we've created amazing structures like carbon nanotubes
 - 100 time stronger than steel and very flexible
 - If added to materials like car bumpers, increases strength and flexibility



Model of a carbon nanotube

Carbon Buckyballs (C60)

- Incredible strength due to their bond structure and “soccer ball” shape
- Could be useful “shells” for drug delivery
 - Can penetrate cell walls
 - Are nonreactive (move safely through blood stream)



Model of Buckminsterfullerene

Limiti della natura, vantaggi dei prodotti artificiali

Le possibilità della materia vivente sono limitate: non può ad esempio sopportare le alte temperature.

Le tecnologie moderne permettono invece di creare condizioni artificiali nelle quali la materia rivela proprietà sorprendenti.

Pensiamo ad esempio agli effetti quantici. Quando le loro dimensioni si avvicinano al nanometro, le particelle acquisiscono nuove proprietà. Così i metalli diventano semiconduttori o isolanti. Alcune sostanze, come il tellururo di cadmio (CdTe), nel nanocosmo sono fluorescenti in tutti i colori dell'iride a seconda delle dimensioni delle particelle.



CdTe nanometrico

L'oro stesso da giallo assume un colore rosso quando le sue dimensioni diventano nanometriche



Particolare di una vetrara del Duomo di Milano (Antonio da Varallo 1493)

Gli atomi di superficie hanno spesso proprietà diverse da quelli situati al centro della particella; di norma sono molto più reattivi (catalisi).

Stumenti e processi



Occhi per il nanocosmo

Progettazione di materiali su scala nanometrica

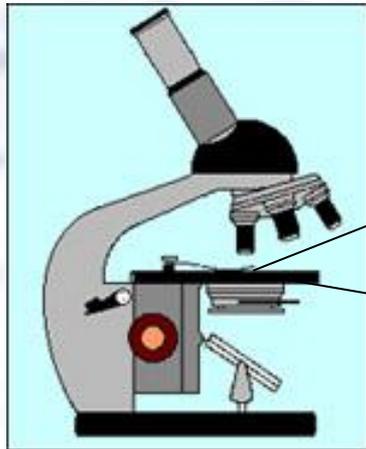
So How Did We Get Here?

New Tools!

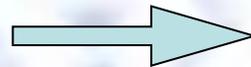
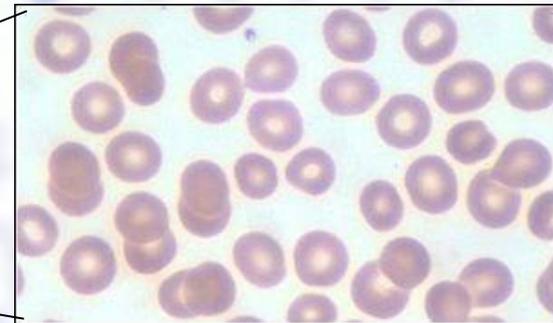
**As tools change, what we can see
and do changes**

Using Light to See

- The naked eye can see to about 20 microns
 - A human hair is about 50-100 microns thick
- Light microscopes let us see to about 1 micron
 - Bounce **light** off of surfaces to create images



Light microscope
(magnification up to 1000x)

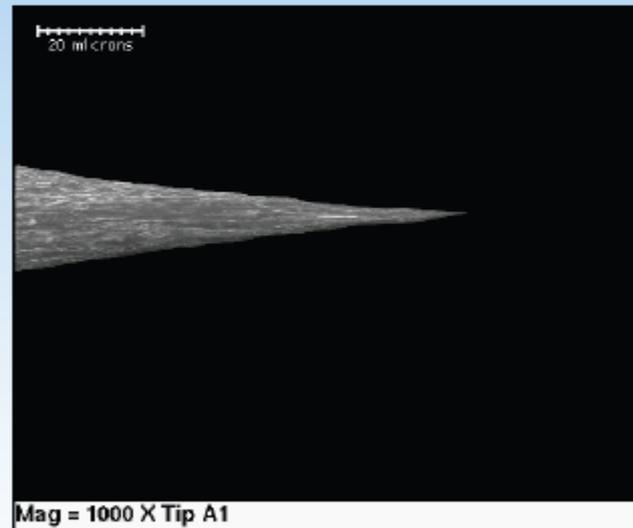
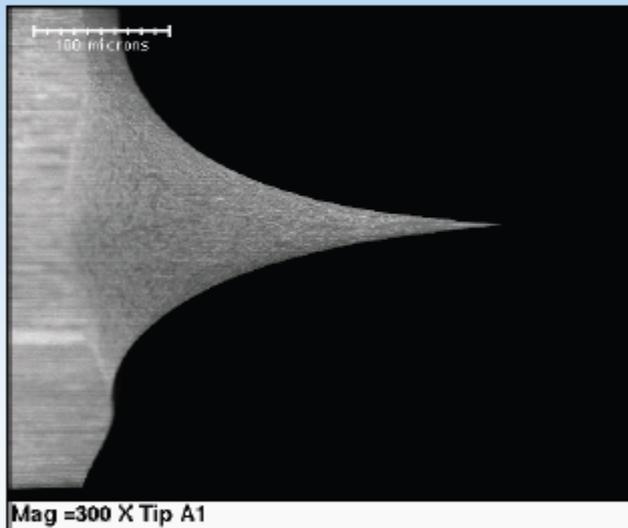


to see red blood cells
(400x)

Scanning Probe Microscopes ⁵³

- Atomic Force Microscope (AFM)
 - A tiny tip moves up and down in response to the **electromagnetic forces** between the atoms of the surface and the tip
 - The motion is recorded and used to create an image of the atomic surface
- Scanning Tunneling Microscope (STM)
 - A flow of **electrical current** occurs between the tip and the surface
 - The strength of this current is used to create an image of the atomic surface

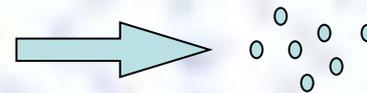
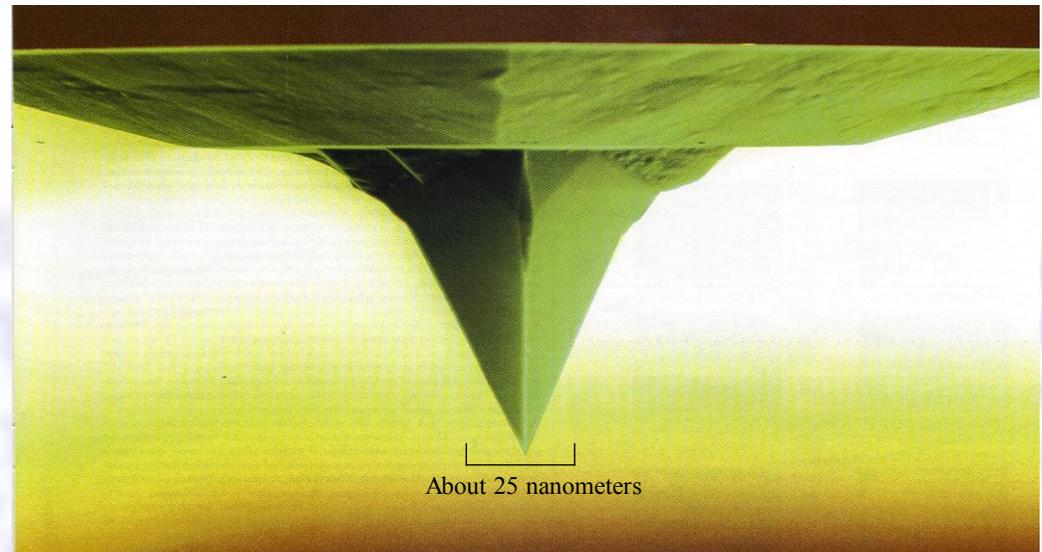
Electrochemically Etched Tungsten STM Tips (Etched in the Hersam Lab at Northwestern University)



These tips, invented at IBM in 1983, started nanofabrication.

Touching the Surface

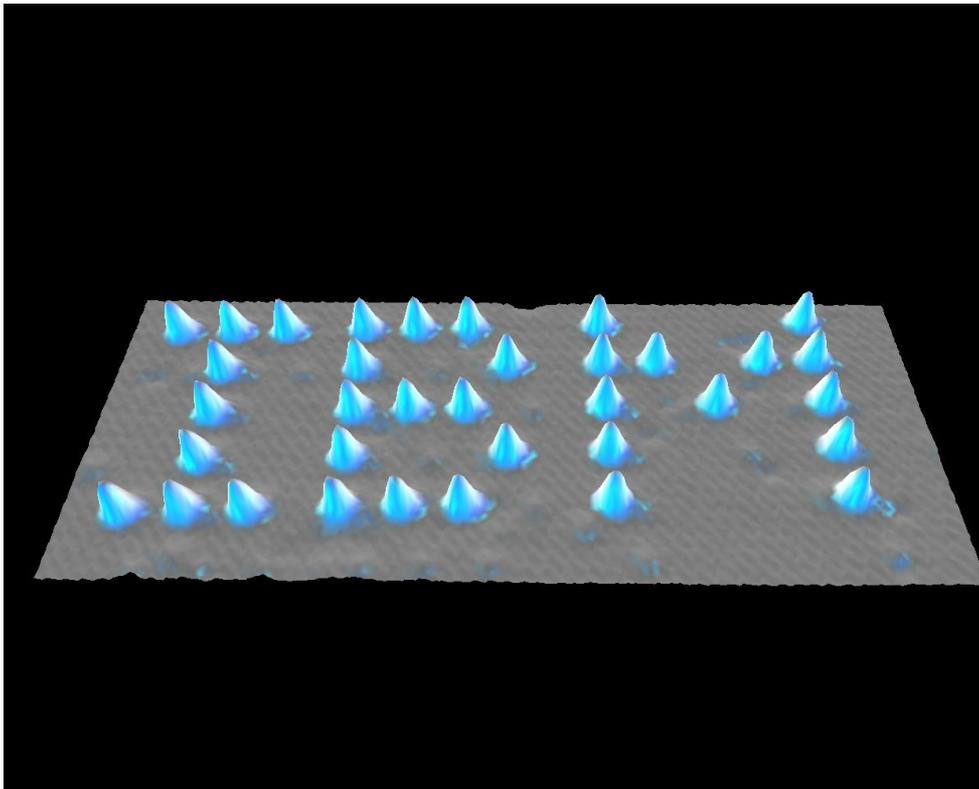
- Scanning probe microscopes, developed in the 1980s, give us a new way to “see” at the nanoscale
- We can now see really small things, like atoms, and move them too!



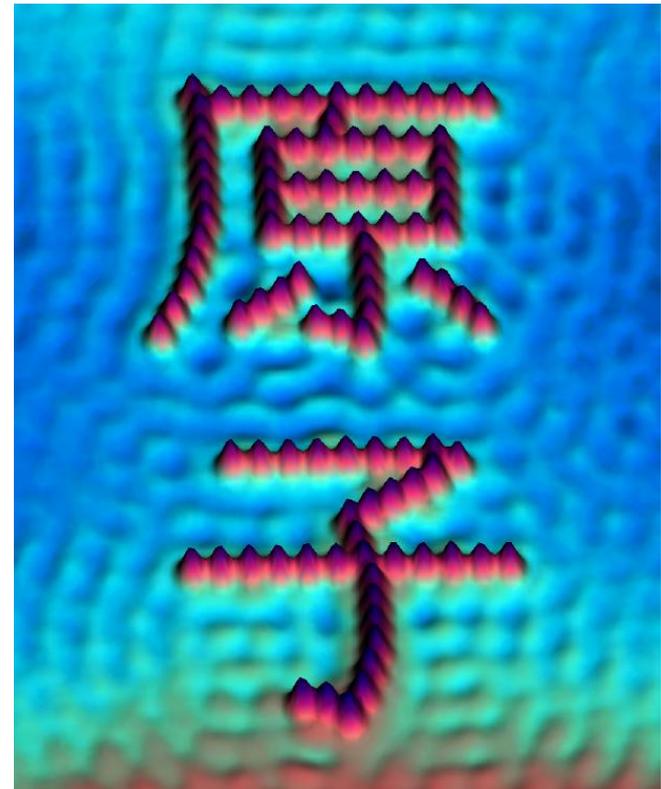
This is about how big atoms are compared with the tip of the microscope

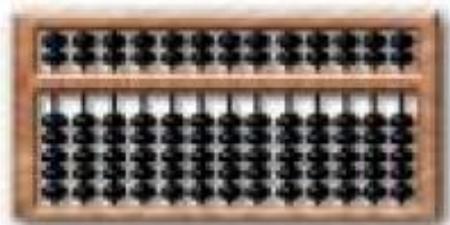
Sonde a scansione per manipolare atomi

Xenon on Nickel (110)
by IBM Labs [IBM Logo]

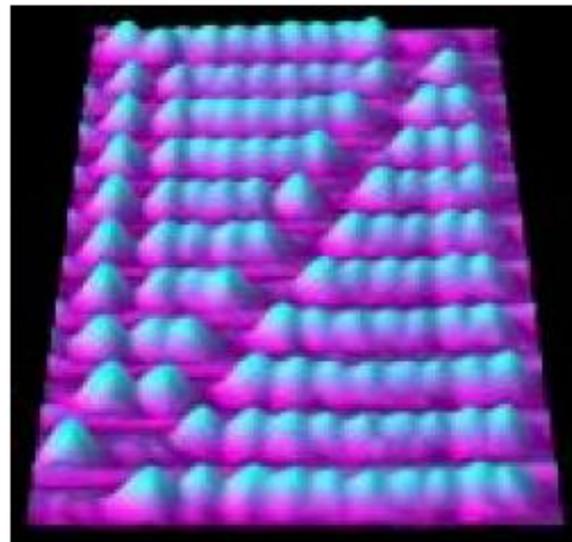


Iron on Copper (111)
IBM Labs [original child=atom]





200 AD
Abacus
China

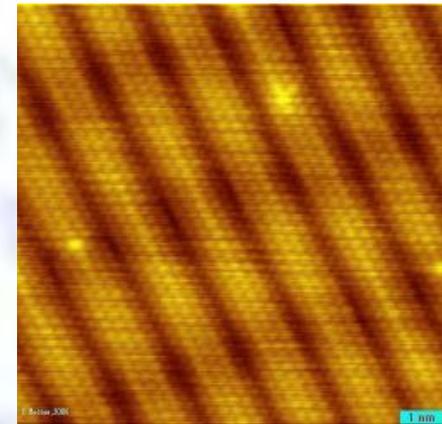
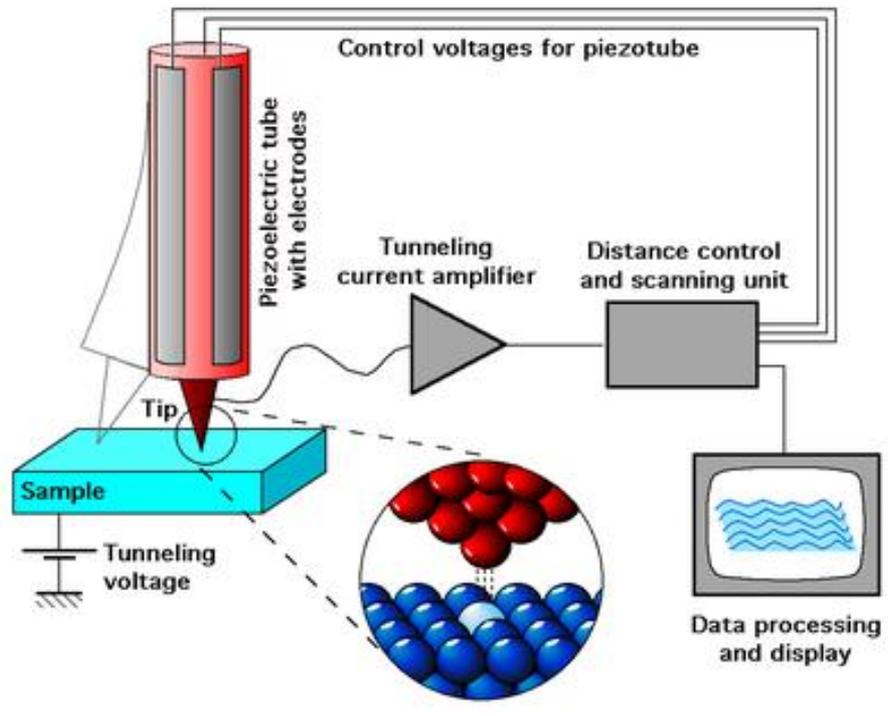


1996
Nano Abacus
IBM

Microscopio a scansione ad effetto tunnel

Le sonde a scansione sono gli occhi che esplorano il Nanocosmo.

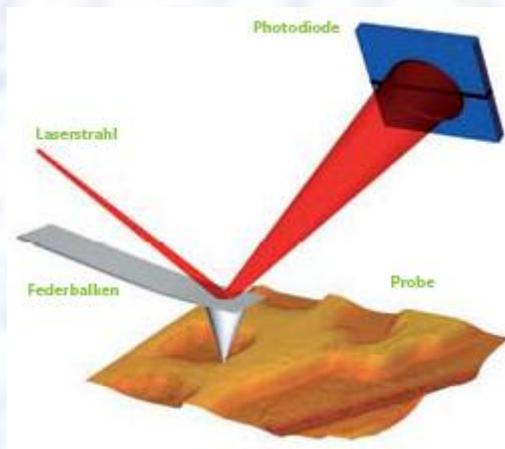
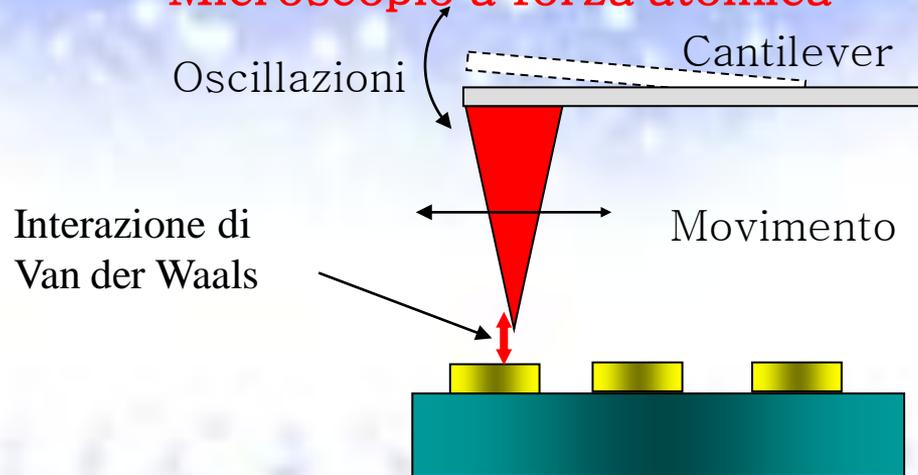
Il microscopio a scansione a effetto tunnel, il progenitore di tutte le sonde a scansione, ha ottenuto il premio Nobel (1986 Binnig e Rohrer).



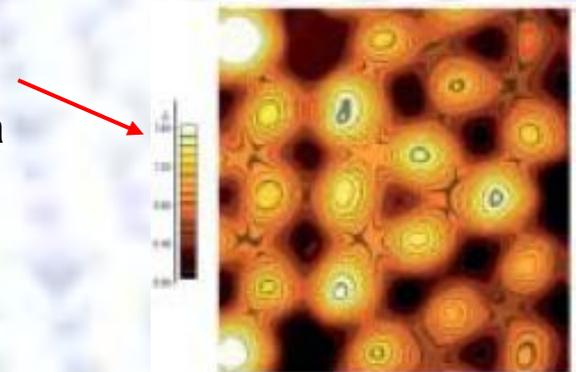
Superficie di un film di Au (100).
Risoluzione 0.2 nm

Sonde a scansione: microscopio a forza atomica

Microscopio a forza atomica

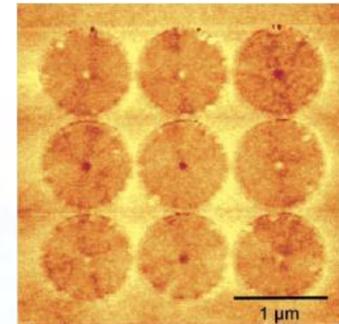
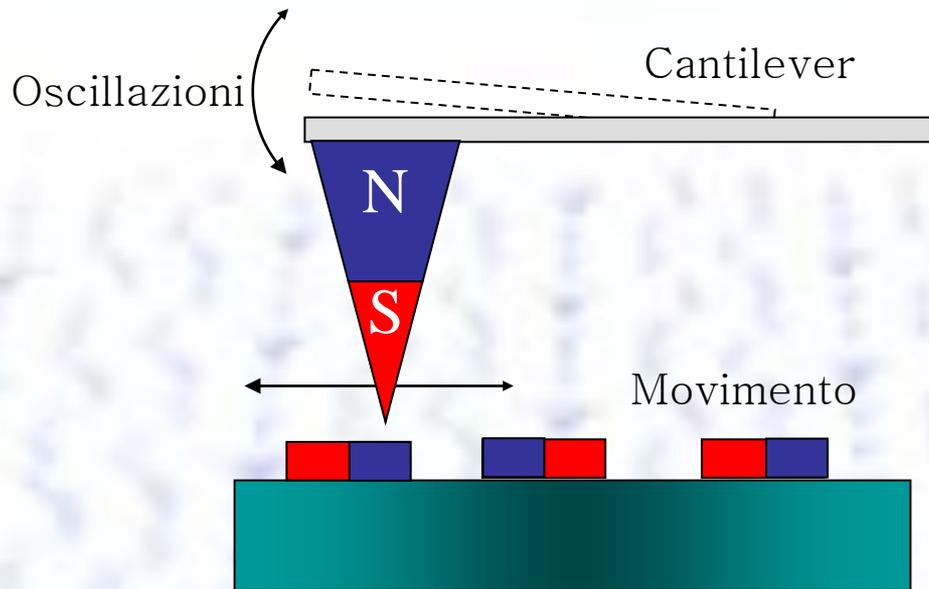


I calcolatori interpretano le misure graficamente su una superficie creando un'immagine esatta su scala atomica, in funzione del principio di misurazione.

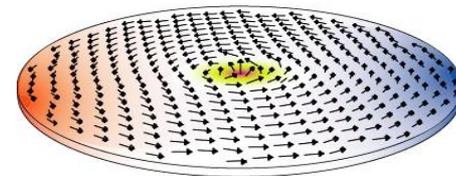


Variazioni sul tema: microscopio a forza magnetica

Microscopio a forza magnetica



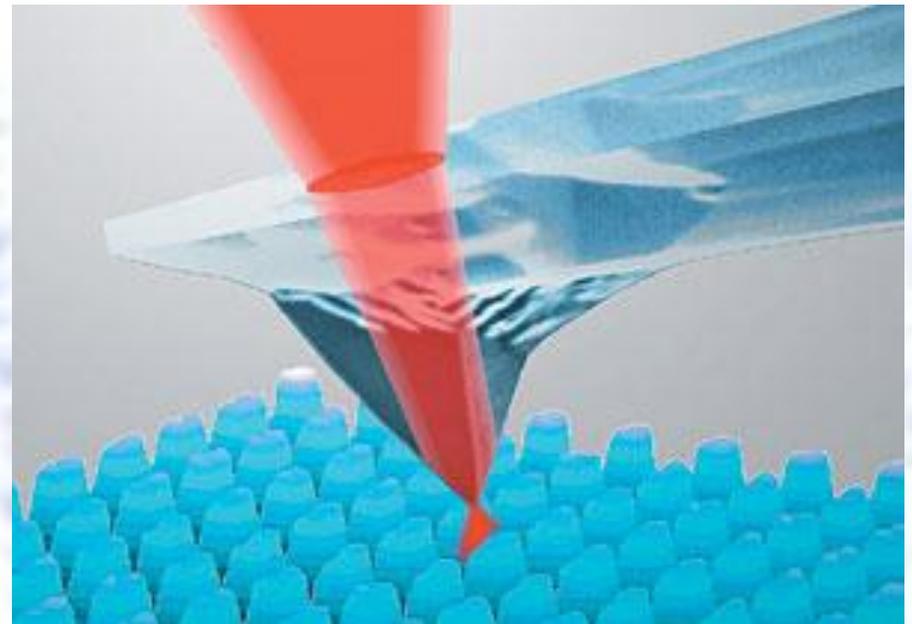
Vortice magnetico in dischi



Microscopio ottico a scansione a campo prossimo

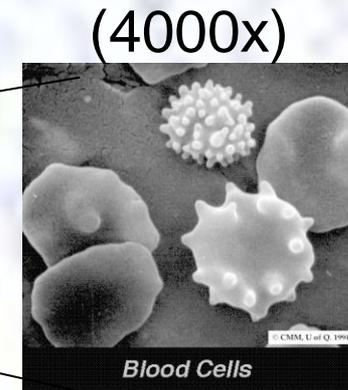
La risoluzione di un microscopio ottico è limitata dalla lunghezza d'onda della luce visibile (700-400 nm).

Costringendo la luce ad uscire da una apertura molto piccola (50 nm) posta in prossimità della superficie da visualizzare (10 nm) si può ottenere una risoluzione fino a 10 volte maggiore.



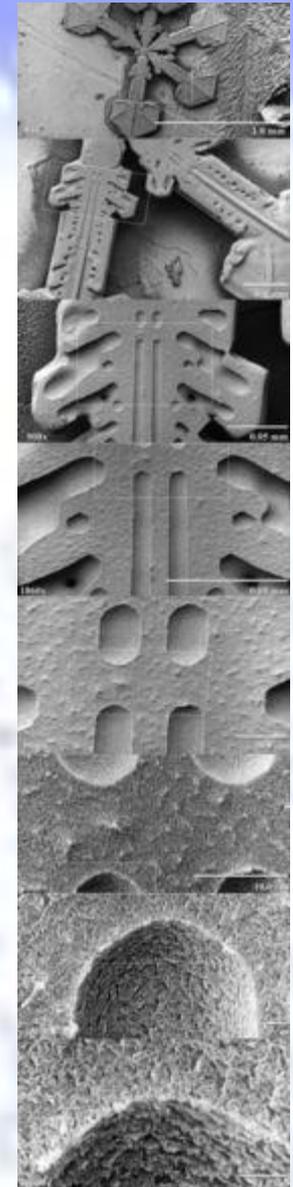
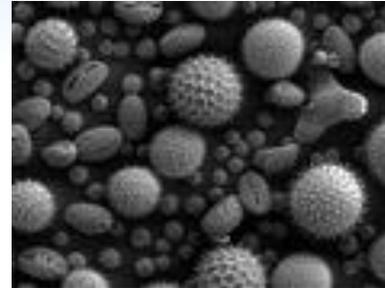
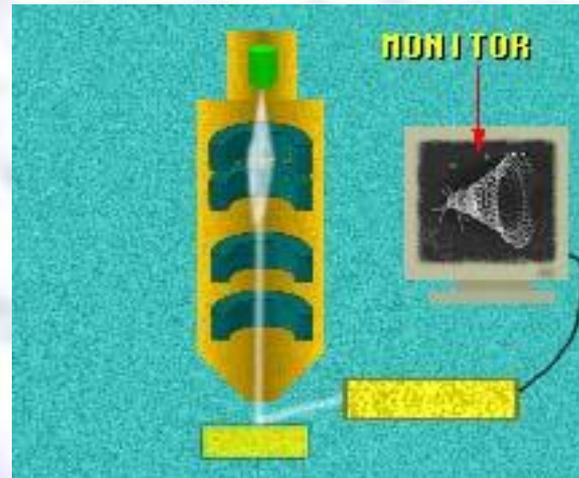
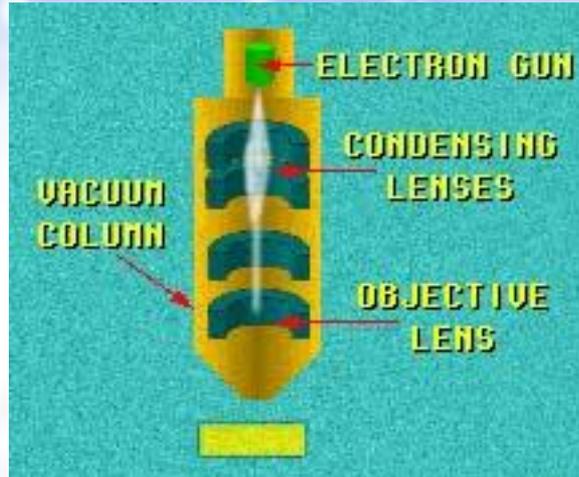
Using Electrons to See

- Scanning electron microscopes (SEMs), invented in the 1930s, let us see objects as small as 10 nanometers
 - Bounce electrons off of surfaces to create images
 - Higher resolution due to small size of electrons



Greater resolution to see things like blood cells in greater detail

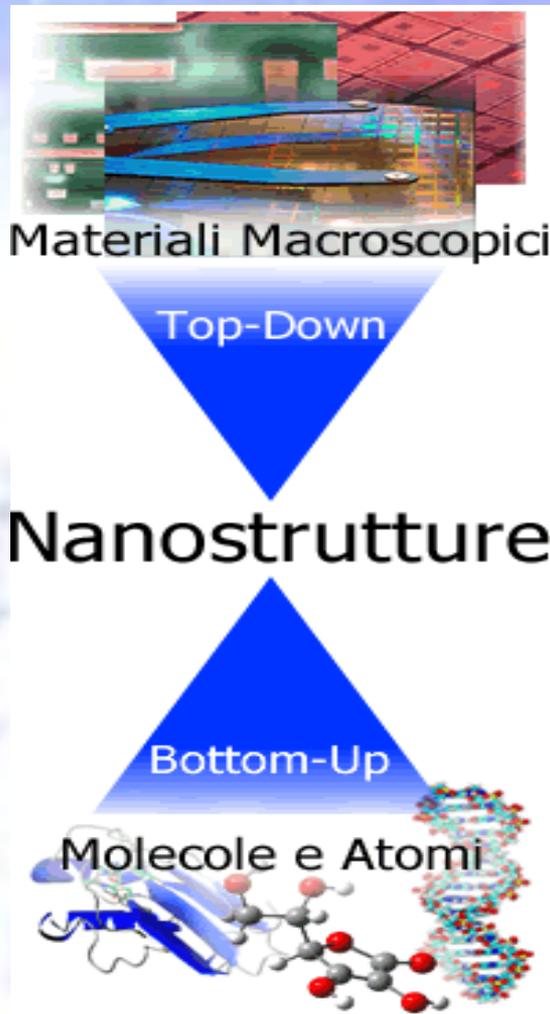
Microscopio elettronico a scansione



Building Nanostructures

How do you build things that are so small?

Come si creano le nanostrutture



Processi di nano-lavorazione per nanostrutture artificiali

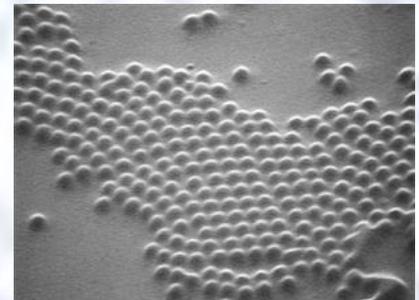
Fenomeni di auto-aggrgazione naturali

Fabrication Methods

- Atom-by-atom assembly
 - Like bricklaying, move atoms into place one at a time using tools like the AFM and STM
- Chisel away atoms
 - Like a sculptor, chisel out material from a surface until the desired structure emerges
- Self assembly
 - Set up an environment so atoms assemble automatically. Nature uses self assembly (e.g., cell membranes)

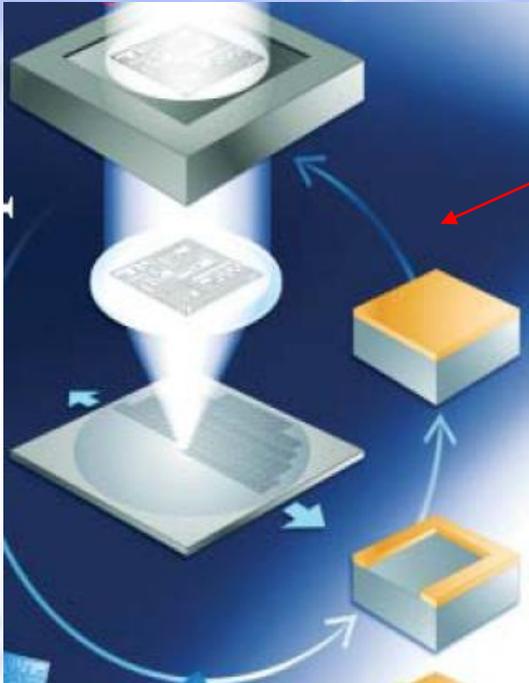


IBM logo assembled from individual xenon atoms



Polystyrene spheres self-assembling

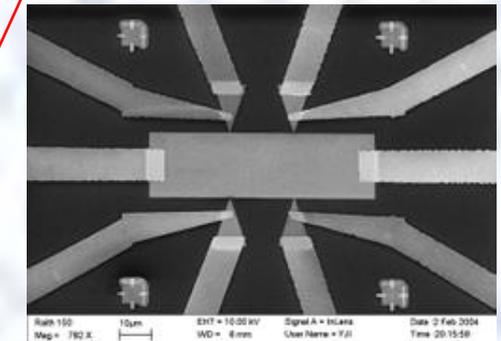
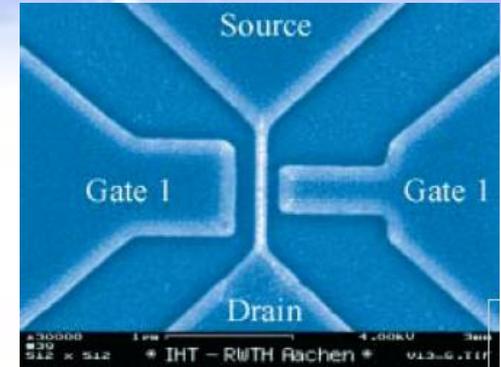
Litografia ottica ed elettronica



La superficie di un Semiconduttore viene ricoperta con uno strato **fotosensibile** sul quale viene proiettata l'immagine del circuito mediante illuminazione con un fascio di luce laser o un fascio di elettroni.

Le zone illuminate si impressionano (come una pellicola fotografica) e vengono rimosse attraverso un attacco chimico.

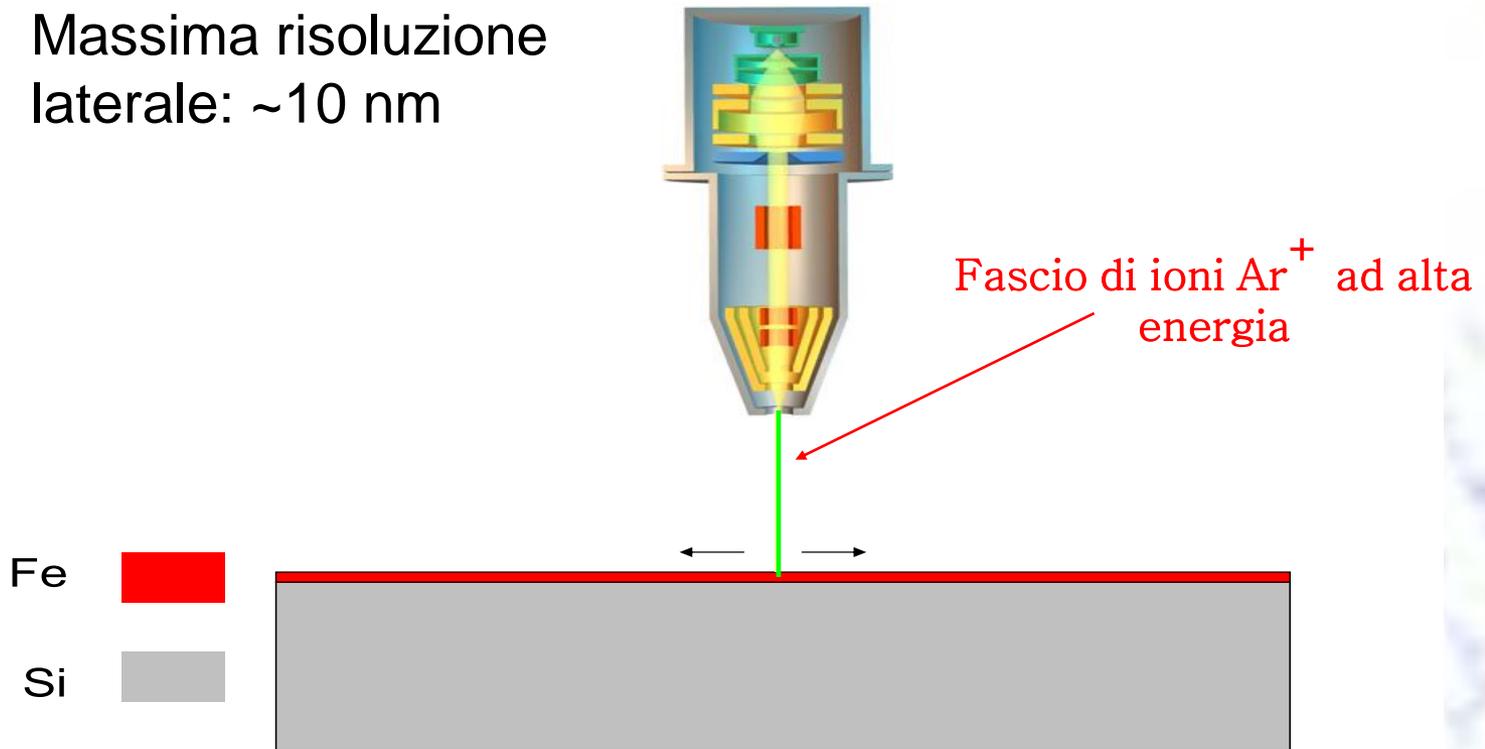
I "buchi" lasciano scoperte zone del wafer le cui proprietà elettriche vengono modificate mediante processi specifici (impiantazione ionica, deposizione).



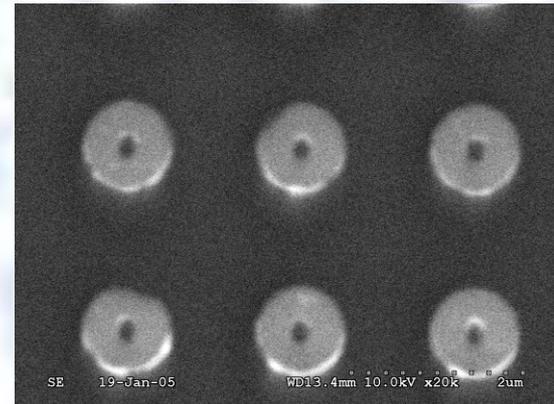
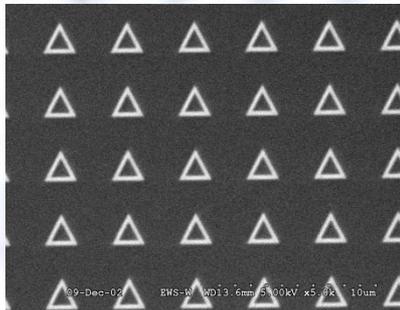
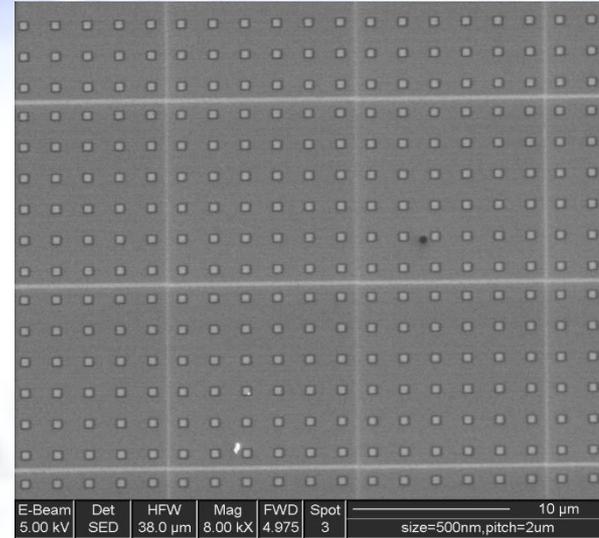
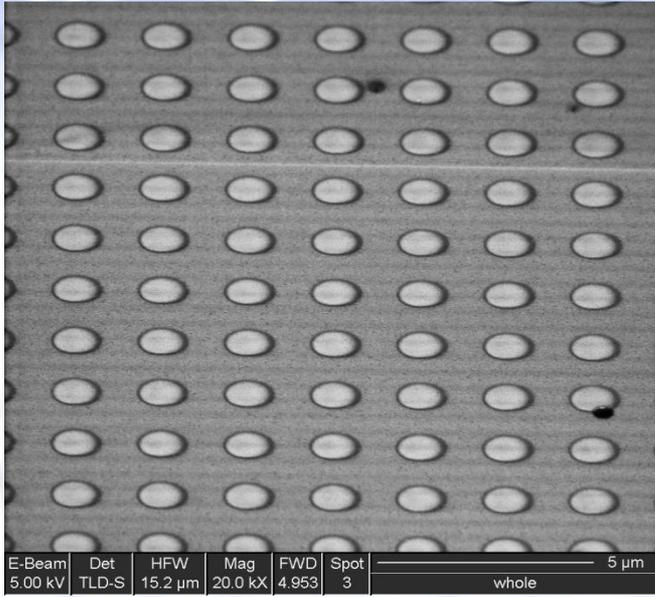
La densità dei transistor è giunta ad un livello tale che mezzo milione di transistor potrebbero stare sul puntino tracciato da una matita.
E non è finita....

Un "nanocesello": Focused Ion Beam (FIB)

Massima risoluzione
laterale: ~10 nm



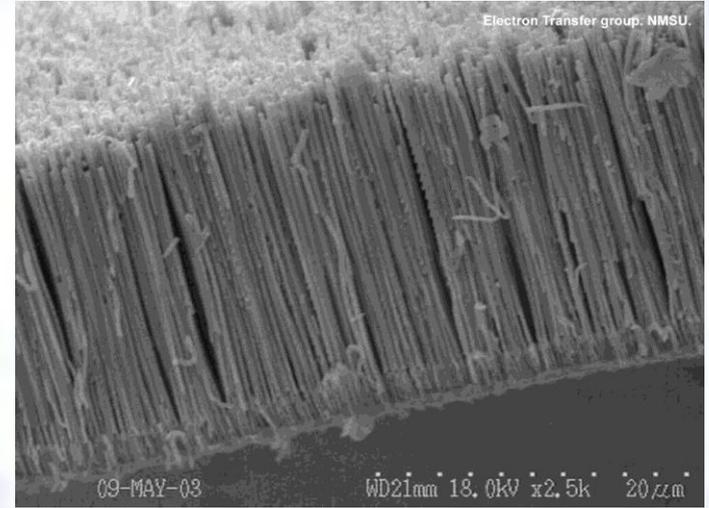
Esempi di nanostrutture preparate con il FIB



Example: Self Assembly By Crystal Growth

70

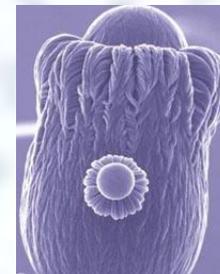
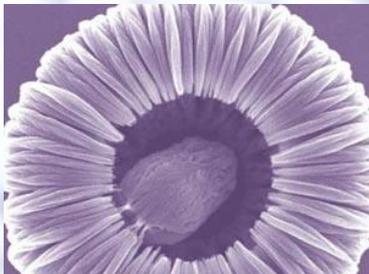
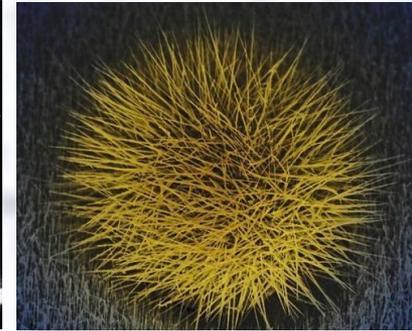
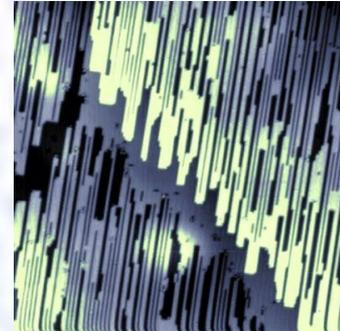
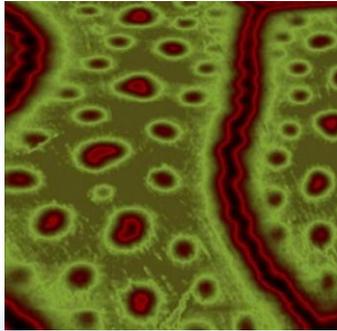
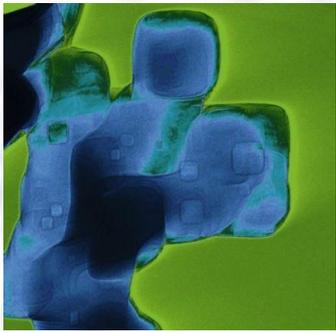
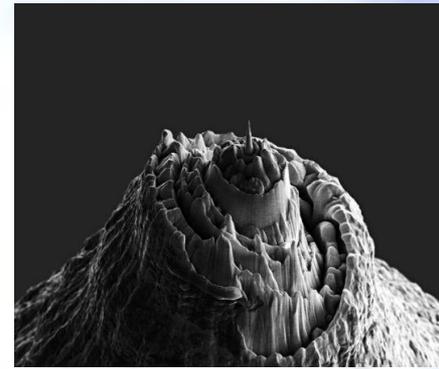
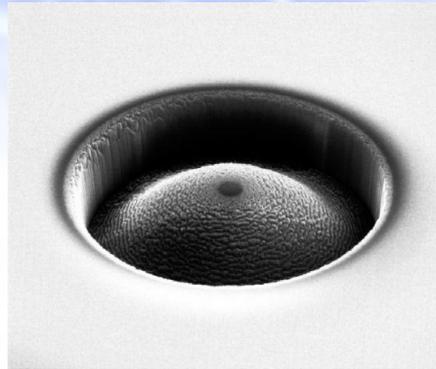
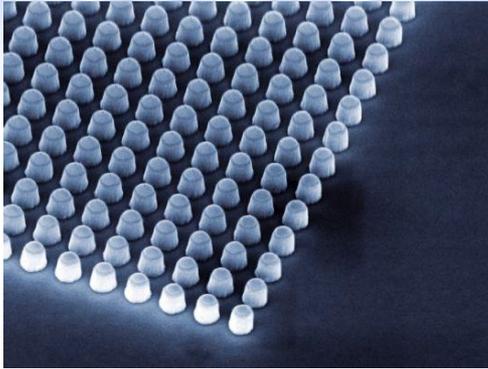
- Grow nanotubes like trees
 - Put iron nanopowder crystals on a silicon surface
 - Put in a chamber
 - Add natural gas with carbon (vapor deposition)
 - Carbon reacts with iron and forms a precipitate of carbon that grows up and out
- Because of the large number of structures you can create quickly, self-assembly is the most important fabrication technique



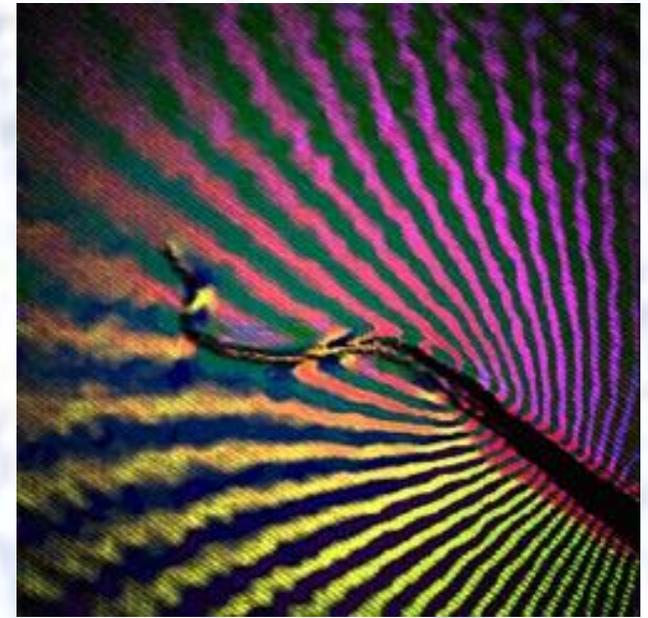
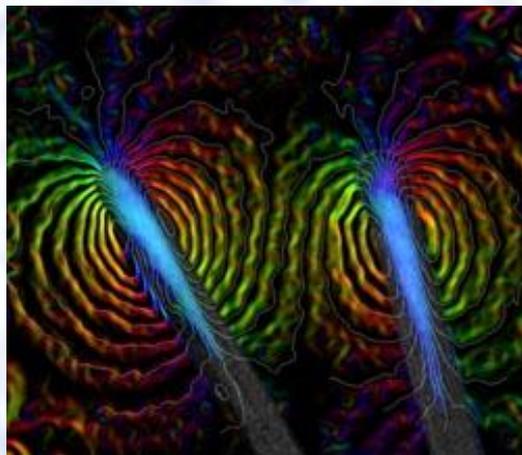
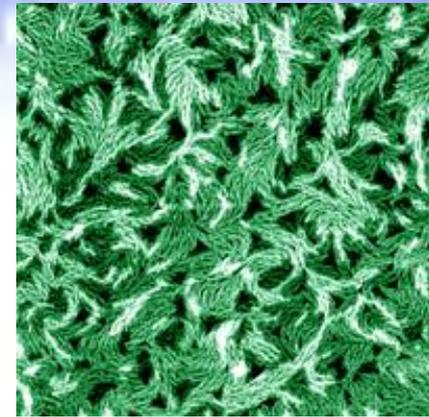
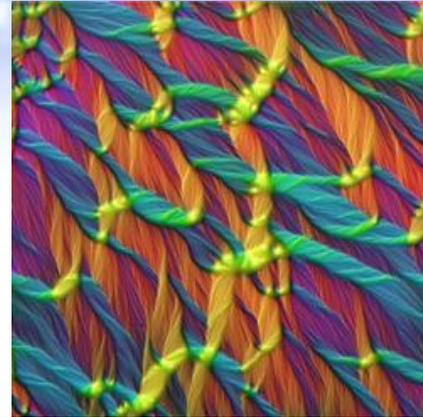
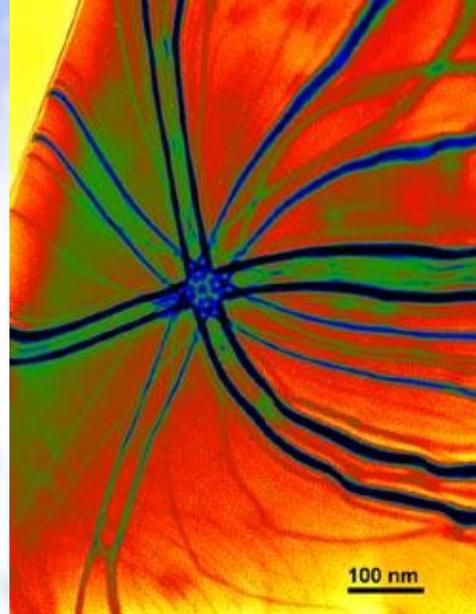
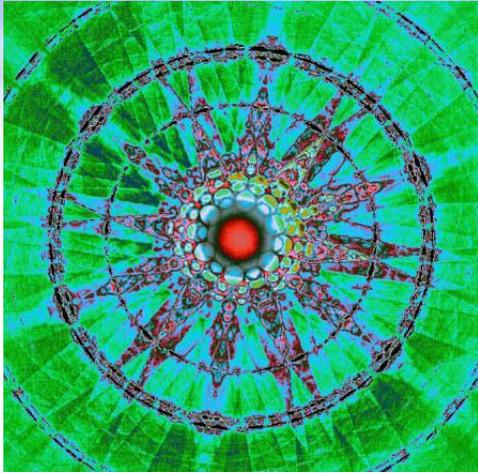
Growing a forest of nanotubes!

70

Immagini dal nanomondo



Nano “opere d’arte”



Le nanotecnologie al servizio della società`

Nanomeccanica e Nanoelettronica

Energia e ambiente

Mobilità`

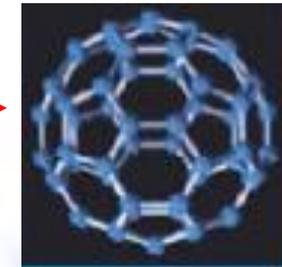
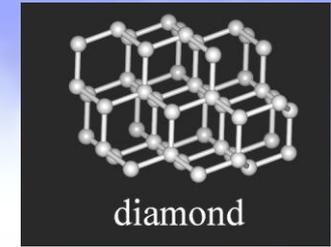
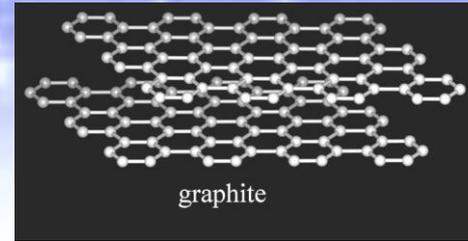
Settore sanitario



I nanotubi di carbonio

Le molte forme del Carbonio

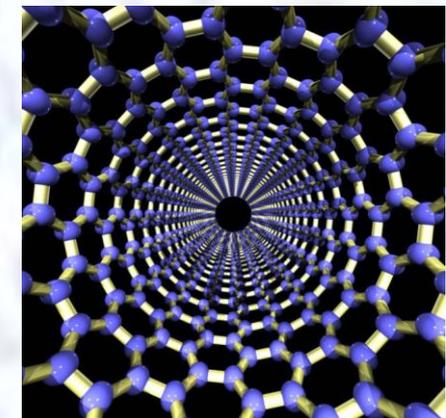
Le forme usuali del Carbonio solido sono la **GRAFITE** o il **DIAMANTE**. Tuttavia su scala nanometrica il Carbonio assume nuove forme! Il Premio Nobel per la Chimica del 1996 è stato assegnato per la scoperta del C_{60}



La ragione per cui molti nanosolidi sono diversi dai corrispondenti solidi di dimensioni maggiori è dovuta soprattutto alla presenza di spigoli e bordi.

Una piccolo foglio di grafite presenterebbe molti dei propri atomi sui bordi, dove sarebbero instabili.

Nel caso del Carbonio, il nanosolido stabile (energia minima) si forma ripiegando i piani atomici in forme tali da evitare il più possibile la presenza dei bordi.

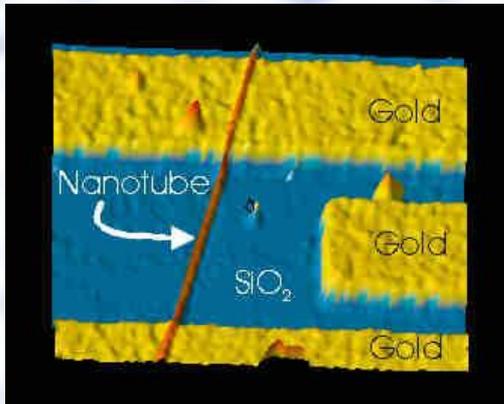
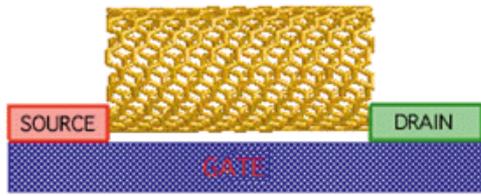


Nanotubi:
fogli arrotolati di grafite senza bordi

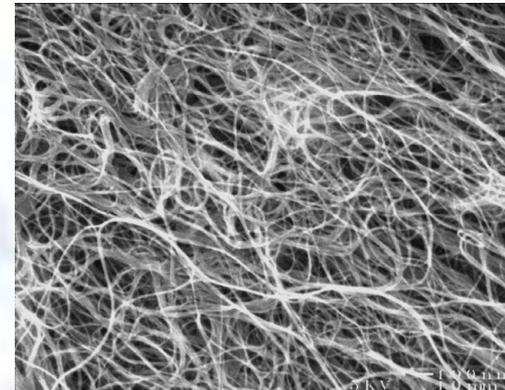
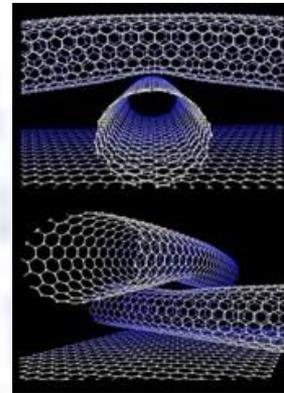
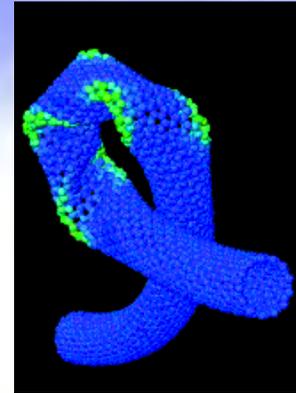
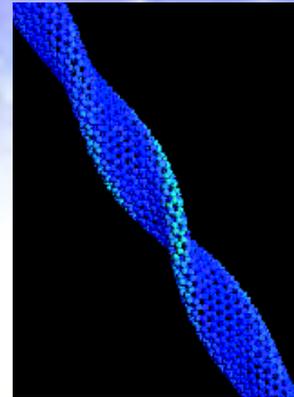
Applicazioni dei nanotubi di carbonio

I nanotubi di carbonio possono essere funzionalizzati: inserendo altri atomi (impurezze) si possono modellare le caratteristiche e ottenere:

- Conducibilità termica del diamante
- Conducibilità elettrica del rame o del silicio (**nanotransistors a nanotubi**)
- Fibre le più tenaci conosciute

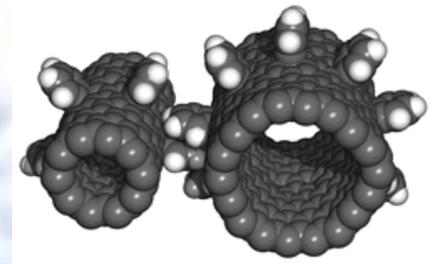


Nanotransistor (IBM)

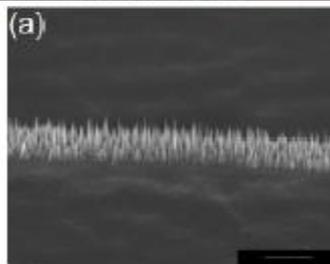


Filando I nanotubi si ottengono fibre per tessuti più tenaci della tela di ragno

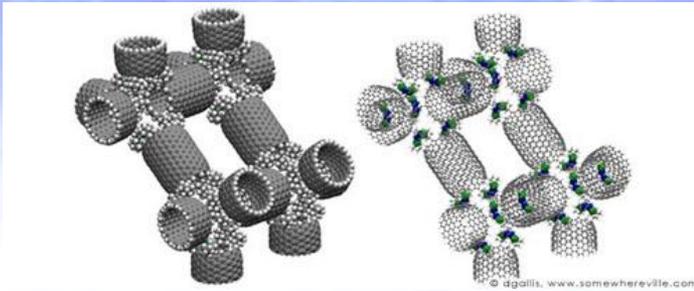
...e anche nanoingranaggi



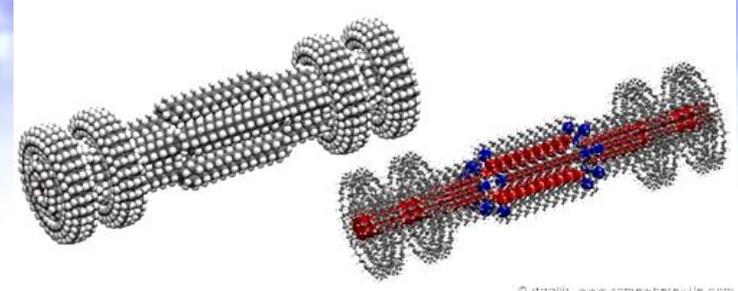
Carbon Nanotubes for Display



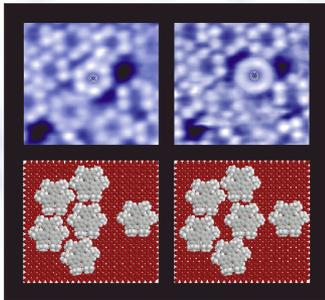
Nanomeccanica



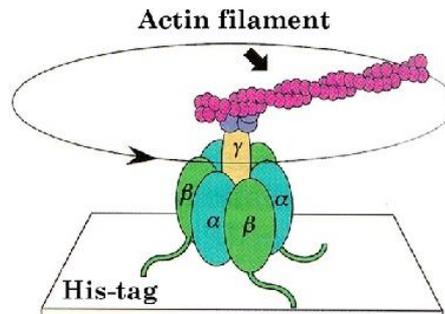
Strutture reticolari con nanotubi



Alberi e pignoni



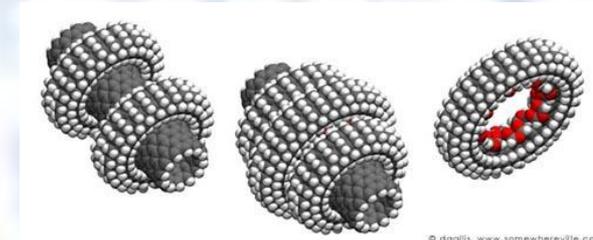
Ingranaggi molecolari



Nano-motore "batterico"

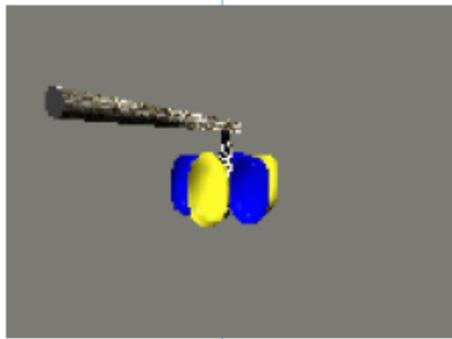


Raccordi e giunti

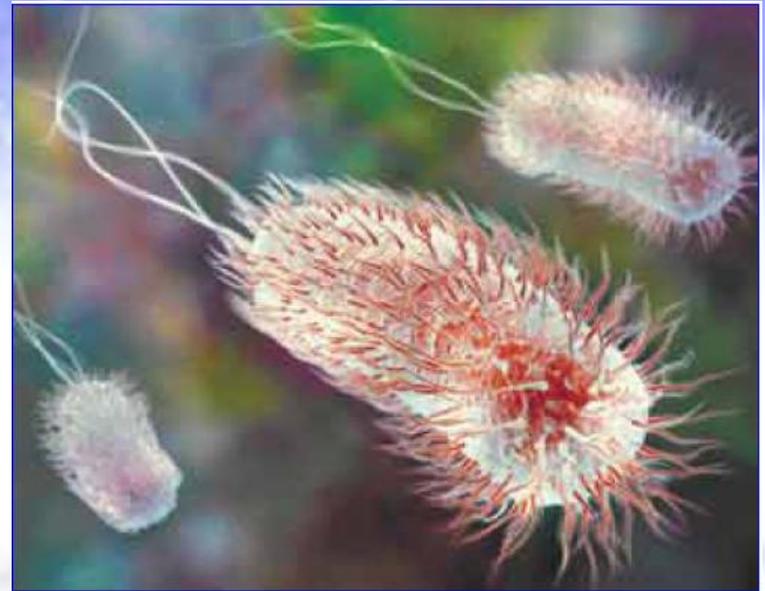


Cuscinetti

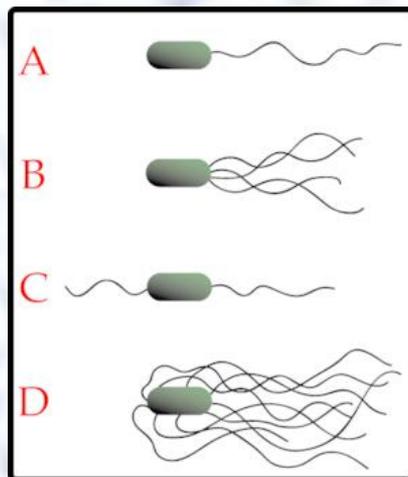
Nanomotori



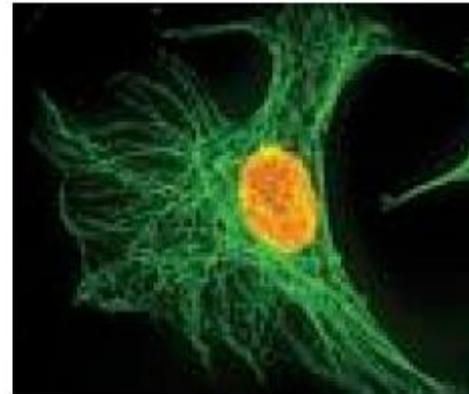
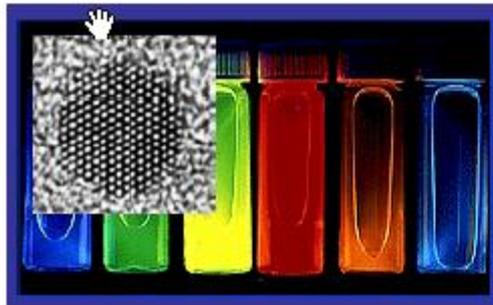
WINGING IT. This tiny engine is based on a single molecule of ATPase bonded to a **propeller** made from protein. It spins at the rate of 3 to 4 revolutions per second.



WHIPLIKE TAILS, found on many bacteria, are propelled by nanomotors. The tiny biochemical motor turns a rotary shaft that spins the tails, or flagella, and allows the bacteria, such as these *E. coli*, to move through liquid. **[See Movie]**



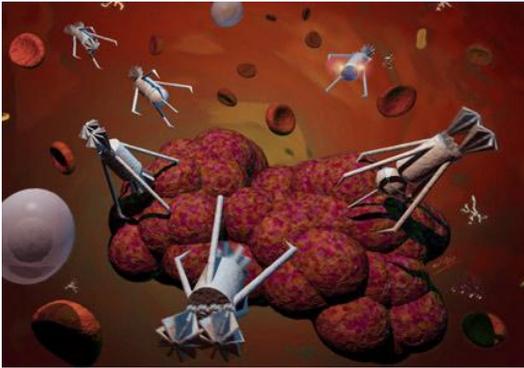
Optical Applications



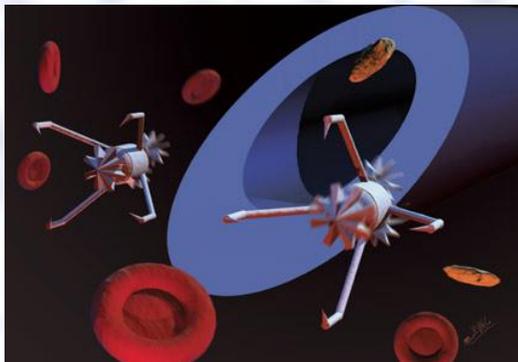
Quantum Dots made of CdSe can be used to replace traditional dye molecules.

Nanorobot per l'esplorazione del corpo umano: viaggio nella fantascienza?

Saranno questi scenari futuribili?

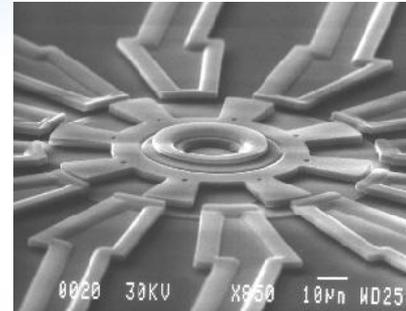


Nanorobot attaccano cellule tumorali

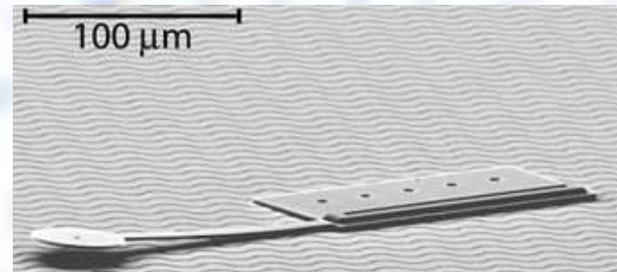


Nanorobot in viaggio attraverso vasi sanguigni

Questo è quello che siamo in grado di fare ora



Un micro-motore



Il robot piu' piccolo realizzato finora

E' stato realizzato dai ricercatori del Dartmouth College : misura 60 x 250 micrometri, si muove strisciando a passi di 1 nm e velocità di 10 nm/s ed è telecomandato

La nanoelettronica

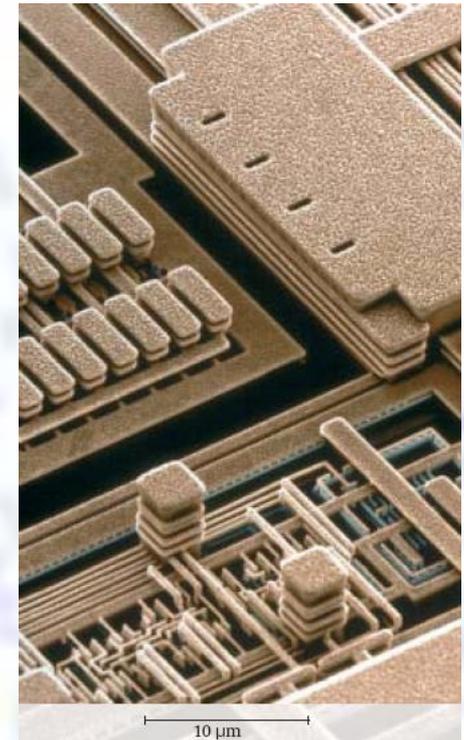
I chip moderni, realizzati attraverso la litografia ottica ed elettronica, hanno strutture larghe circa 100 nm e con più di 100 milioni di transistor per chip e si stanno ponendo le basi realizzare nel silicio strutture di appena 35 nanometri di larghezza dotate di oltre un miliardo di transistor per chip.

Ci si sta dunque approssimando ad un limite di fondo: il circuito di un conduttore non può essere più sottile di un atomo. Inoltre cominciano a farsi sentire gli effetti quantistici.

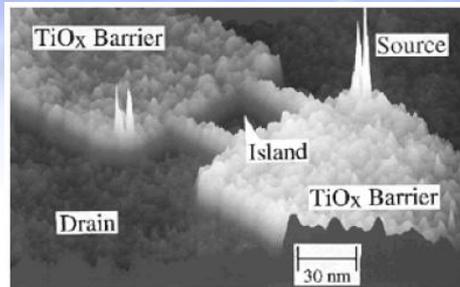
Nano-chip tridimensionali

❖ I grattacieli sono stati la soluzione giusta a Manhattan, quando è stato necessario costruire nuovi uffici e abitazioni ma scarseggiavano i terreni edificabili. Naturalmente anche i progettisti di chip hanno pensato presto alla terza dimensione, ma gli sforzi in questa direzione si sono scontrati con tutta una serie di problemi.

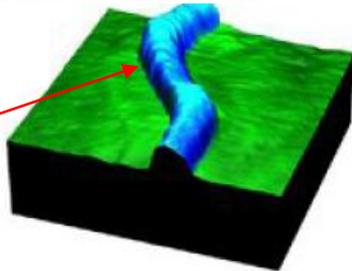
La società Infineon di Monaco ha forse aperto una strada verso la terza dimensione, perché è riuscita a far sviluppare dei nanotubi di carbonio sui wafer di silicio su cui si collocano i chip.



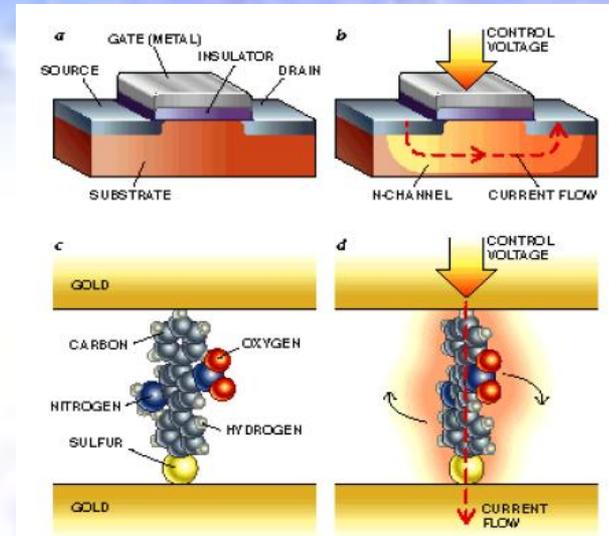
Verso il nano-computer e il computer quantistico



Nanotubo piegato



Nano-transistor a singolo elettrone: si sfruttano gli effetti quantistici per realizzare funzionalità “classiche”.



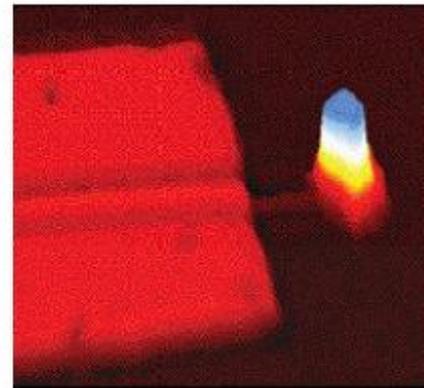
Transistor molecolare: alcune molecole (es. DNA) possono realizzare funzioni simili a transistor, diodi e conduttori.

.....oppure perché non sfruttare gli effetti quantistici per realizzare “architetture” diverse piu’ appropriate al mondo quantistico. Un dispositivo di questo genere si chiama q-bit (quantum bit). Una sequenza (parola) di n-bit, o meglio **n-qbit**, può immagazzinare ed elaborare simultaneamente 2^n numeri. Con l’architettura attuale servirebbero 2^n dispositivi. Si potranno forse realizzare computer così potenti da avere capacità equivalenti o superiori al cervello umano?

Nano Lasers



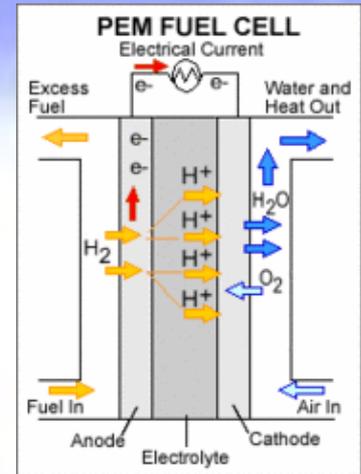
GaN nanowire
Peidong Yang
UC Berkeley



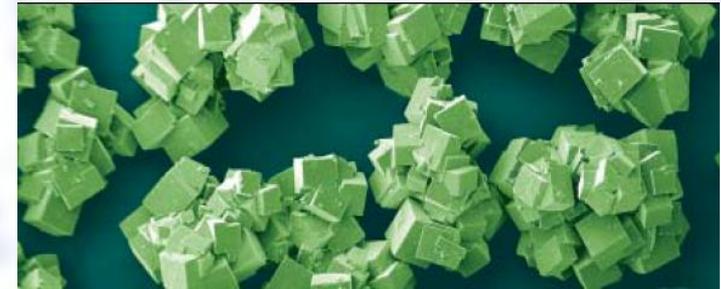
CdS Nanowire
Charlie Lieber
Harvard

Energia e ambiente

Le celle a combustibile somigliano alle batterie: forniscono elettricità. Mentre però gli ingredienti chimici di una batteria finiscono con l'esaurirsi, la cella a combustibile si alimenta in continuazione. Sfruttano idrogeno puro o un altro fluido contenente idrogeno come il gas naturale o l'olio di colza. Il prodotto della reazione non è altro che acqua pura.



Il livello di efficienza delle celle a combustibile sarà elevato (80% se si usa idrogeno puro, 40% con metanolo o altre sostanze) utilizzando superfici a struttura nanometrica, come i “nanocubi” metallici a fianco, che grazie alla loro nanoporosità, possono immagazzinare grandi quantità di idrogeno e comportarsi come catalizzatori (effetti di superficie).



Nelle nostre case stanno arrivando le prime caldaie a gas naturale dotate di celle a combustibile, che producono in modo regolabile **calore** ed **elettricità**.

Nanomaterials for Battery Applications

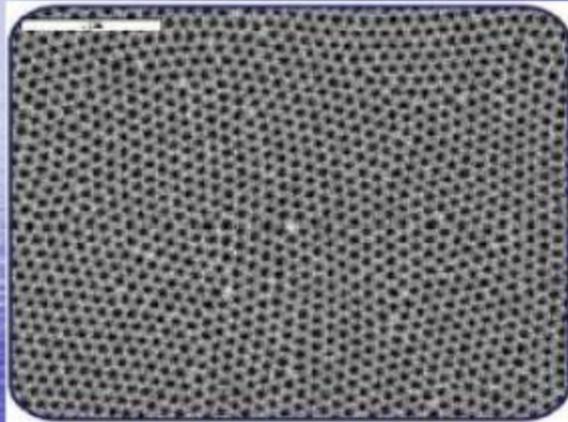
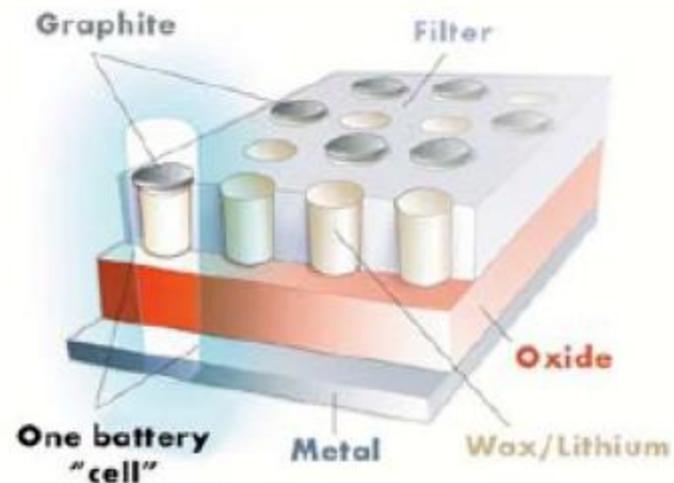


Figure 1. Scanning electron micrograph of the surface of a nanopore alumina template membrane prepared in the Martin lab.

Charles Martin in Univ of Florida



Energia e ambiente

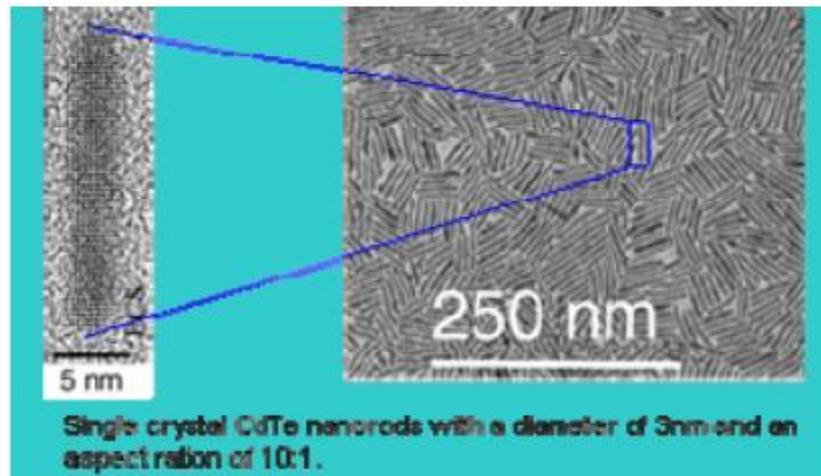
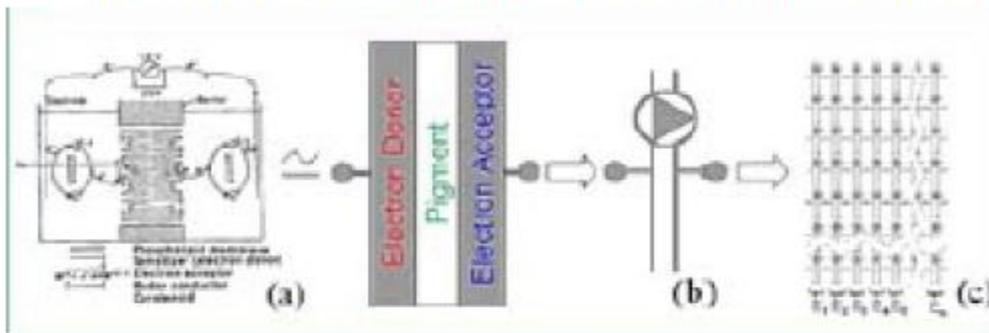
In Europa quasi il 10% dell'energia elettrica prodotta è utilizzata per l'illuminazione. I LED (diodi emettitori di luce) realizzati con **strati nanometrici ad alta efficienza** che convertono l'elettricità in luce, possono ormai produrre anche luce bianca e dunque sostituire la tecnologia tradizionale. Questa sostituzione comporterebbe notevoli risparmi, in quanto i LED richiedono solo il **50%** dell'energia elettrica consumata da una lampadina normale per dare la stessa quantità di luce.



Nelle nostre case milioni di televisori a tubi catodici saranno presto sostituiti da apparecchi con tecnologia LCD (schermo a cristalli liquidi) e a lungo termine con tecnologia **OLED** (diodi emettitori di luce organici). Queste due tecnologie potrebbero ridurre il consumo energetico del **90%**.

Se milioni di famiglie risparmiassero ogni anno qualche kilowatt, il risultato finale si misurerebbe in **gigawatt** e corrisponderebbe alla capacità di diverse grandi centrali elettriche.

Nano Photovoltaic Materials



Energia e ambiente



Grazie alla nanotecnologia l'energia solare diventerà una soluzione praticabile ed un buon affare.

- ❖ Miglioramento dell'efficienza;
- ❖ Minor quantità di materiale.

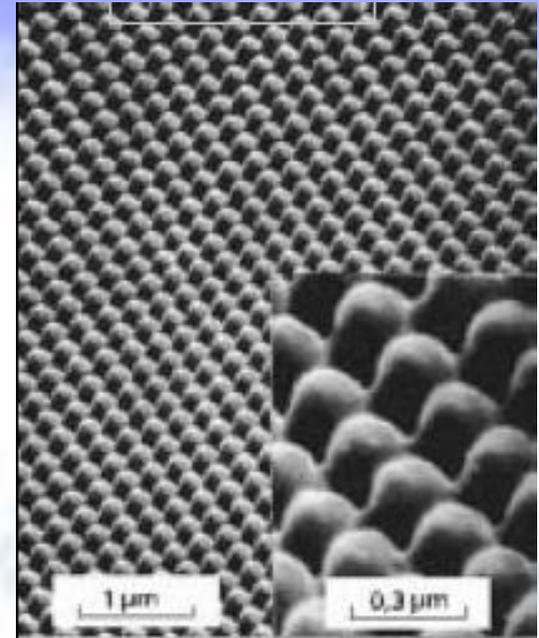


I campioni di laboratorio di film per celle solari, prodotti con una tecnica di rivestimento simile a quella utilizzata per i LED e gli OLED, offrono un rendimento di **100 watt per 30 grammi di materiale.**

Mobilità

La nanotecnologia nelle automobili

- ❖ I parabrezza possono diventare resistenti ai graffi grazie a rivestimenti a base di nanoparticelle molto dure; il vetro rimane totalmente trasparente in quanto le nanoparticelle sono così piccole che non disperdono la luce. Questo principio è già utilizzato nelle lenti degli occhiali.
- ❖ La vernice delle automobili potrebbe avere una struttura a petalo di loto che fa scorrere via lo sporco oppure potrebbe essere progettata come una cella solare.
- ❖ I parabrezza con rivestimenti a nanoparticelle potrebbero anche servire alla climatizzazione dell'abitacolo riflettendo, in misura maggiore o minore, la luce e il calore mediante un controllo elettronico (vetri fotocromici). Applicata agli uffici, una tecnica di questo tipo consentirebbe di risparmiare grandi quantità di energia.
- ❖ I LED oggi sono così luminosi che raggruppandoli insieme si possono utilizzare come fari.



Settore sanitario

- ❖ Il dentifricio (esiste già) contiene nanoparticelle di apatite e di proteine, il materiale naturale dei denti che li aiuta ad autoripararsi (cfr. anche la sezione “biomineralizzazione”).
- ❖ La crema da giorno (anch’essa già disponibile) contiene nanoparticelle di ossido di zinco che proteggono dalle radiazioni ultraviolette nocive. Le nanoparticelle sono invisibili e la crema non è bianca ma perfettamente trasparente.
- ❖ Grazie alla nanoelettronica saranno disponibili in commercio apparecchiature di analisi complesse a prezzi accessibili (lab-on-chip).
- ❖ Per l’analisi del sangue del futuro basterà una piccola puntura sul dito.
- ❖ Si possono anche dirigere nanoparticelle magnetiche su focolai tumorali, che vengono poi riscaldati da un campo elettromagnetico alternato con conseguente distruzione del tumore. Le nanoparticelle possono anche raggiungere i tumori cerebrali. Questa terapia, denominata **“ipertermia a flusso magnetico”**, è stata messa a punto da un gruppo di lavoro diretto dal biologo Andreas Jordan. Le prove cliniche stanno iniziando ora.

La nanotecnologia nella vita quotidiana del futuro

Vernice a nanoparticelle anticorrosione

Vetro termocromico per regolare il flusso luminoso

I pannelli piezo evitano vibrazioni fastidiose

Articolazioni dell'anca in materiali biocompatibili

Il casco permette di restare in contatto con la persona che lo indossa

I vestiti intelligenti misurano il polso e controllano la respirazione

Il telaio di Buckytube è leggero come una piuma pur essendo molto solido

Le celle a combustibile forniscono corrente per telefoni e veicoli

Strati magnetici per una memoria dati compatta

OLED (diodi organici emettitori di luce) per schermi

Fellicola fotovoltaica che trasforma la luce in elettricità

I LED (diodi emettitori di luce) oggi sono così potenti da far concorrenza alle lampadine

Vetrine antigraffio che sfruttano l'effetto loto

Menù in cartoncino elettronico

Nanotubi per i nuovi schemi dei portatili

Tessuto con rivestimento antimacchia



Opportunità e rischi

❖ **Esiste da parte di molti il timore che le nanoparticelle possano avere anche effetti indesiderati sull'uomo e l'ambiente alla stregua di altre polveri ultrasottili come le particelle presenti nei gas di scarico dei veicoli (PM 10).**

Nanoricercatori e tossicologi effettuano continuamente monitoraggi e esperimenti necessari per valutare gli effetti sulla salute e l'ambiente.

❖ **I rischi tuttavia sembrano controllabili perché le nanoparticelle individuate in natura sono estremamente “appiccicose”: si aggregano molto facilmente in grumi di maggiori dimensioni di cui il corpo si può liberare senza difficoltà. Alcune nanoparticelle, di cui si sa già che non sono nocive per la salute, sono utilizzate nelle creme solari come fattore di protezione o sono mescolate ad un'altra sostanza alla quale sono legate saldamente. In questo modo l'utilizzatore non entra minimamente in contatto diretto con le singole nanoparticelle.**

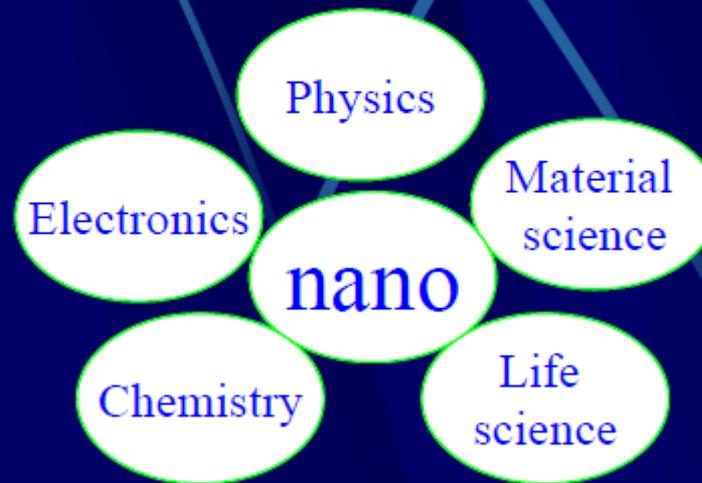
Conclusions

What is nanotechnology?

Nanotechnology is about creating and using structures, devices and systems that have novel properties and functions because of their small size.

Conclusions

**Nanotechnology is
multi-disciplinary**



Conclusions

Nanotechnology is about the future.

