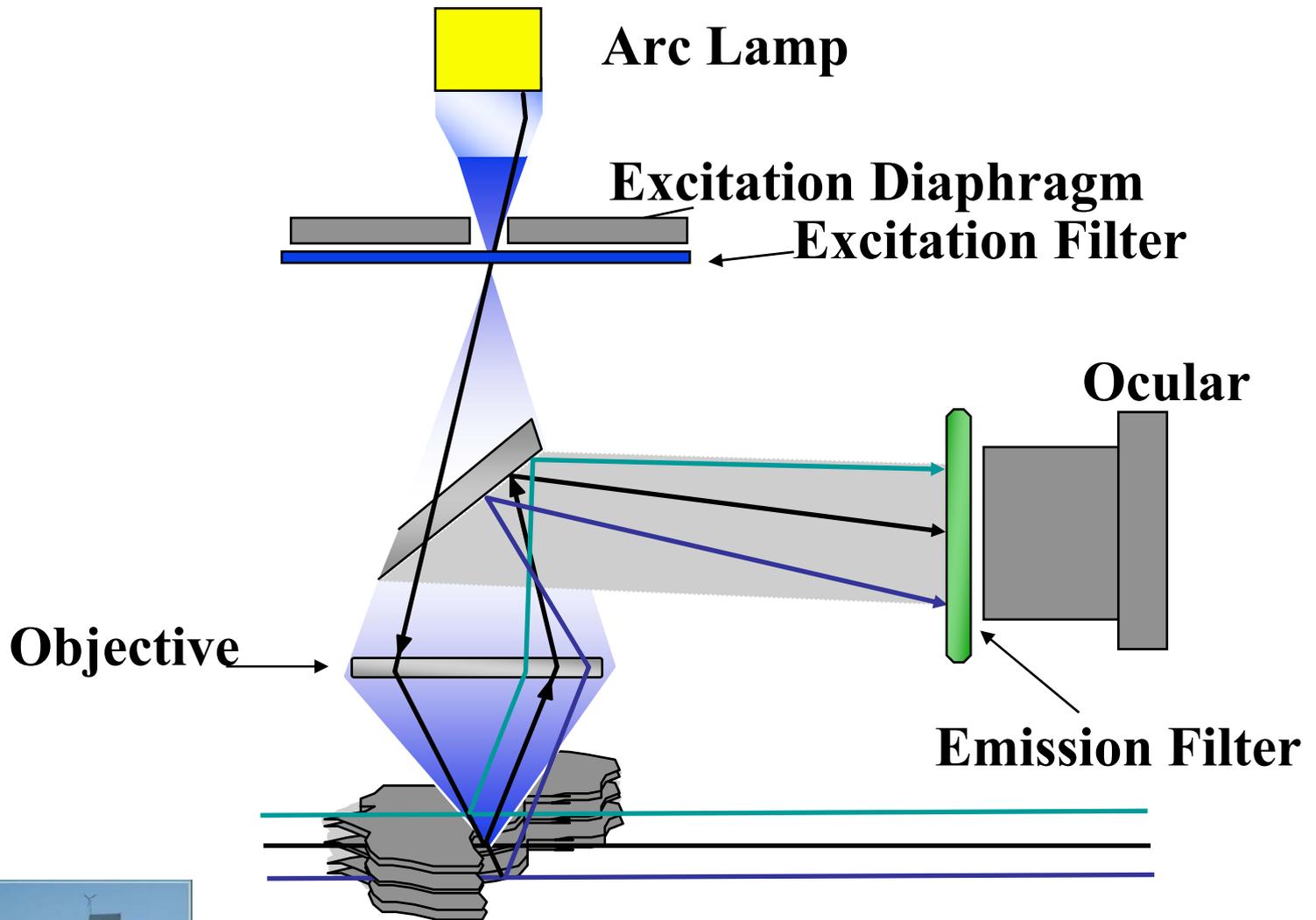


# Proprietà quantistiche della materia: qualche applicazione

- Proprietà ondulatorie della materia: microscopia elettronica
- Applicazione dell'effetto tunnel: Scanning Tunneling Microscope
- Applicazioni alla nanofabbricazione

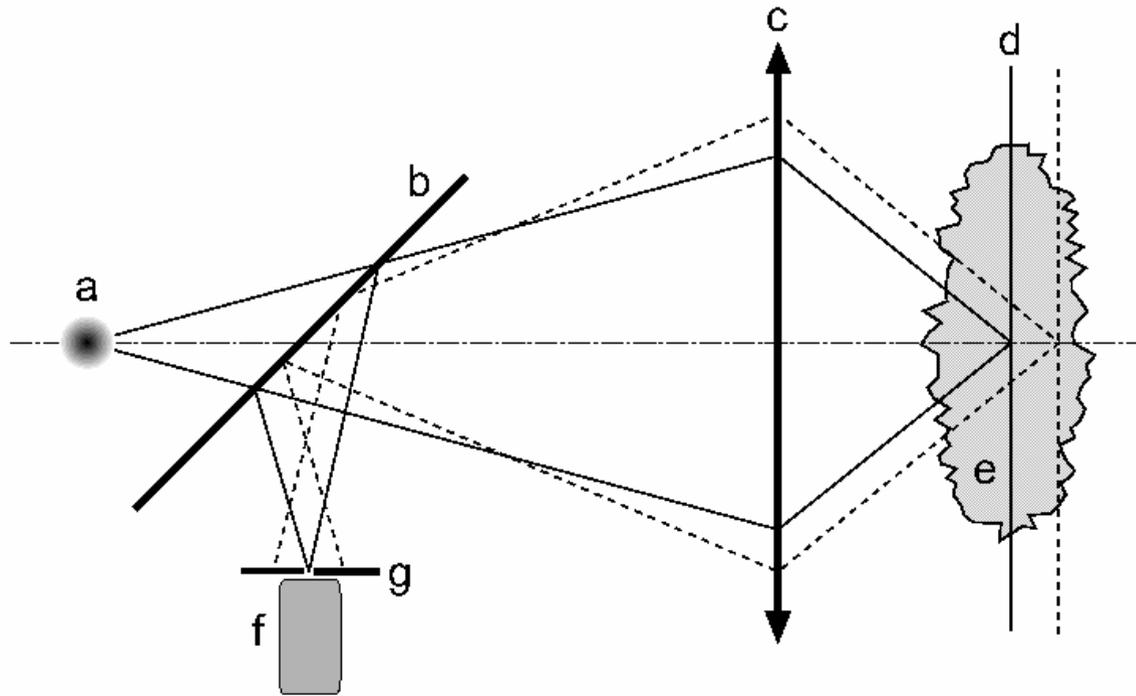


# Microscopia Ottica

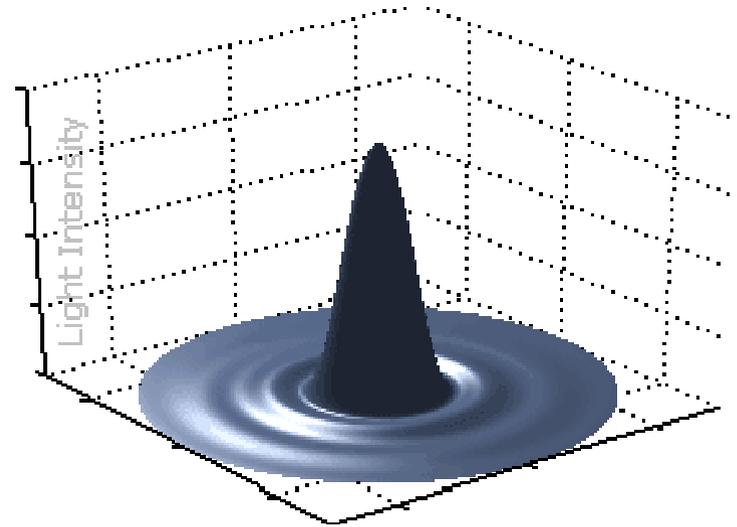
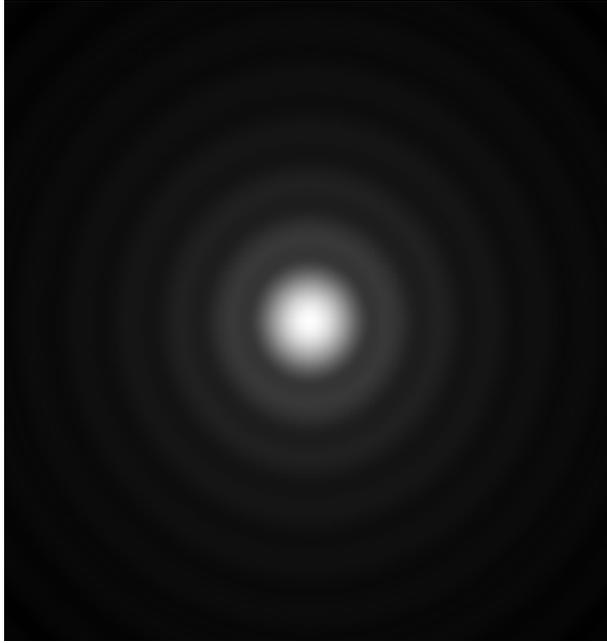


# Principali fattori che limitano la risoluzione

## 1) Profondità di campo



# 2 Diffrazione



Minima dimensione laterale dello spot nel punto focale dell'ordine di

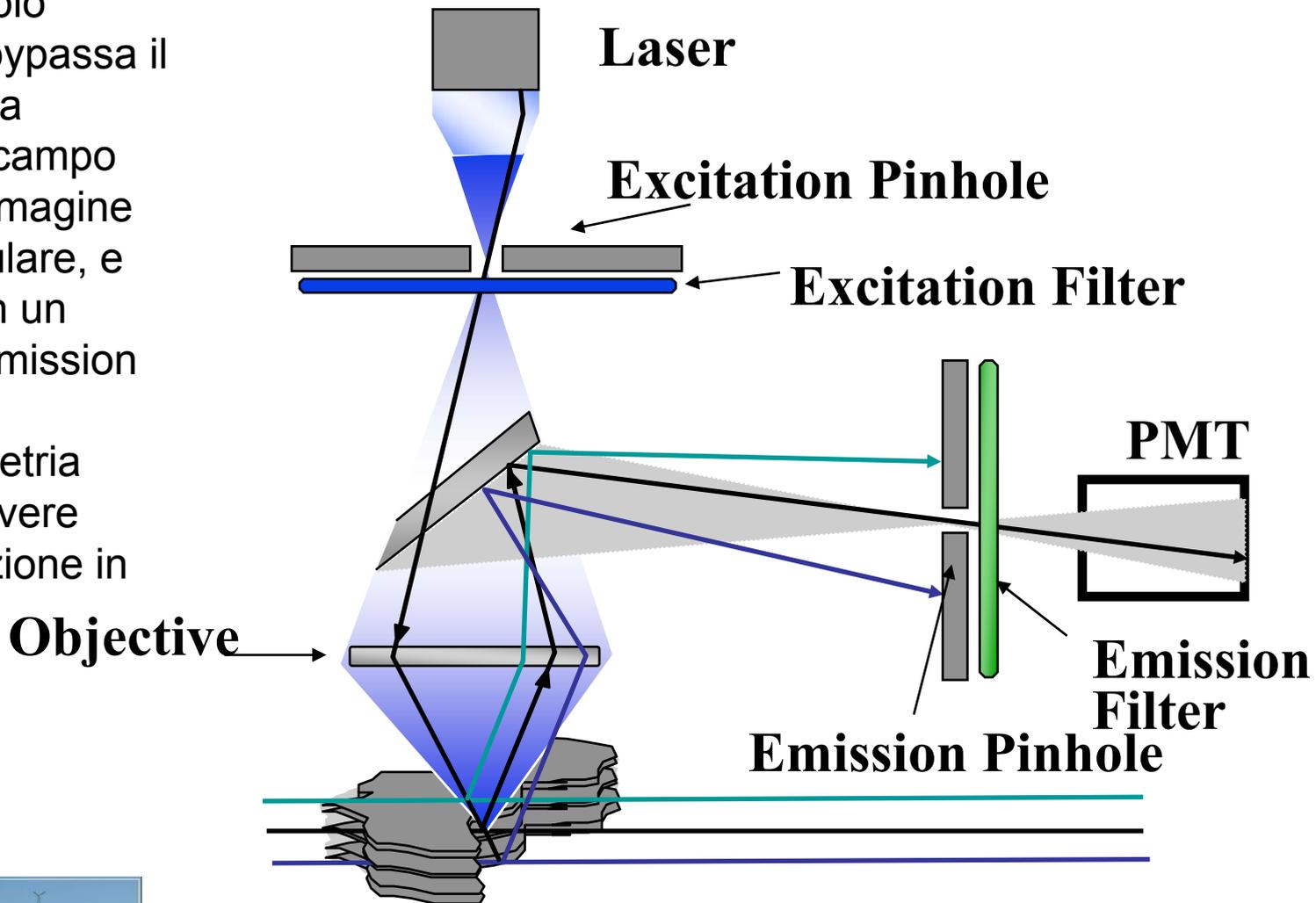
$$\Delta x = 0.61 \frac{\lambda}{n \times \sin \Theta}$$



# Microscopia confocale

Nel microscopio confocale si bypassa il problema della profondità di campo riscreano l'immagine prima dell'oculare, e filtrandola con un diaframma (emission pin-hole).

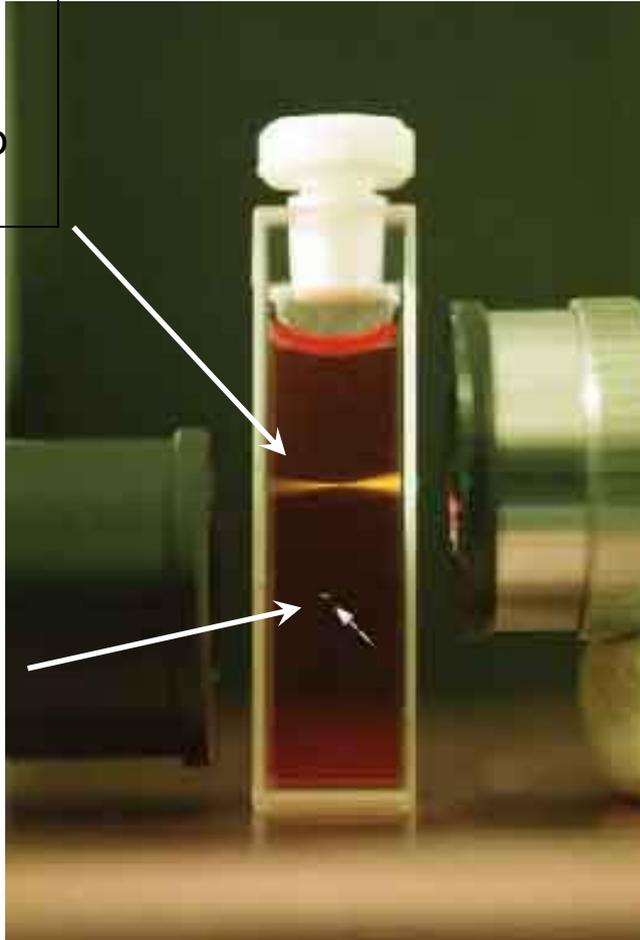
Questa geometria consente di avere un'alta risoluzione in profondità



# Microscopia a due fotoni

Luce emessa in seguito all'assorbimento di 1 fotone

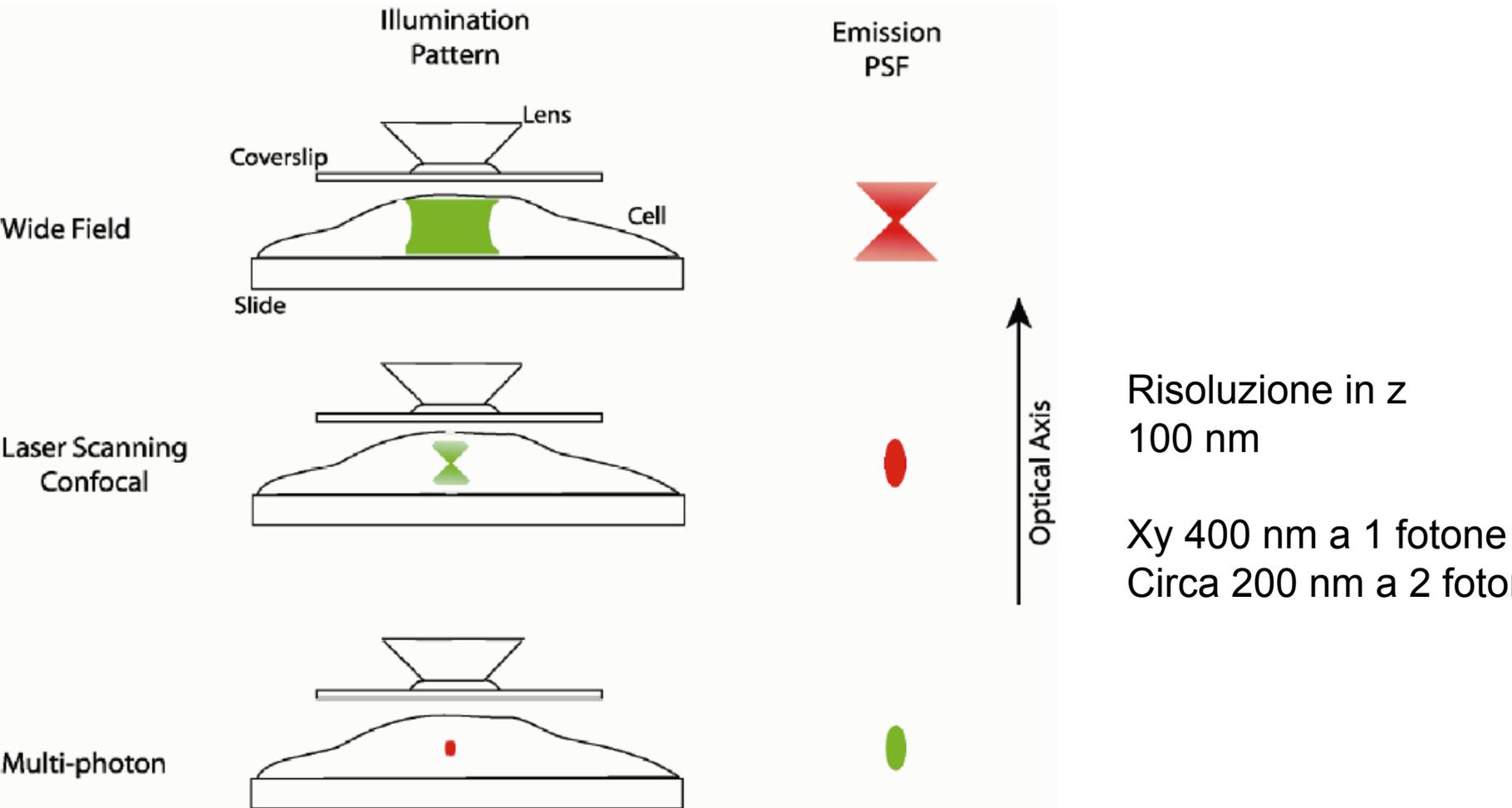
Luce emessa in seguito all'assorbimento di 2 fotoni



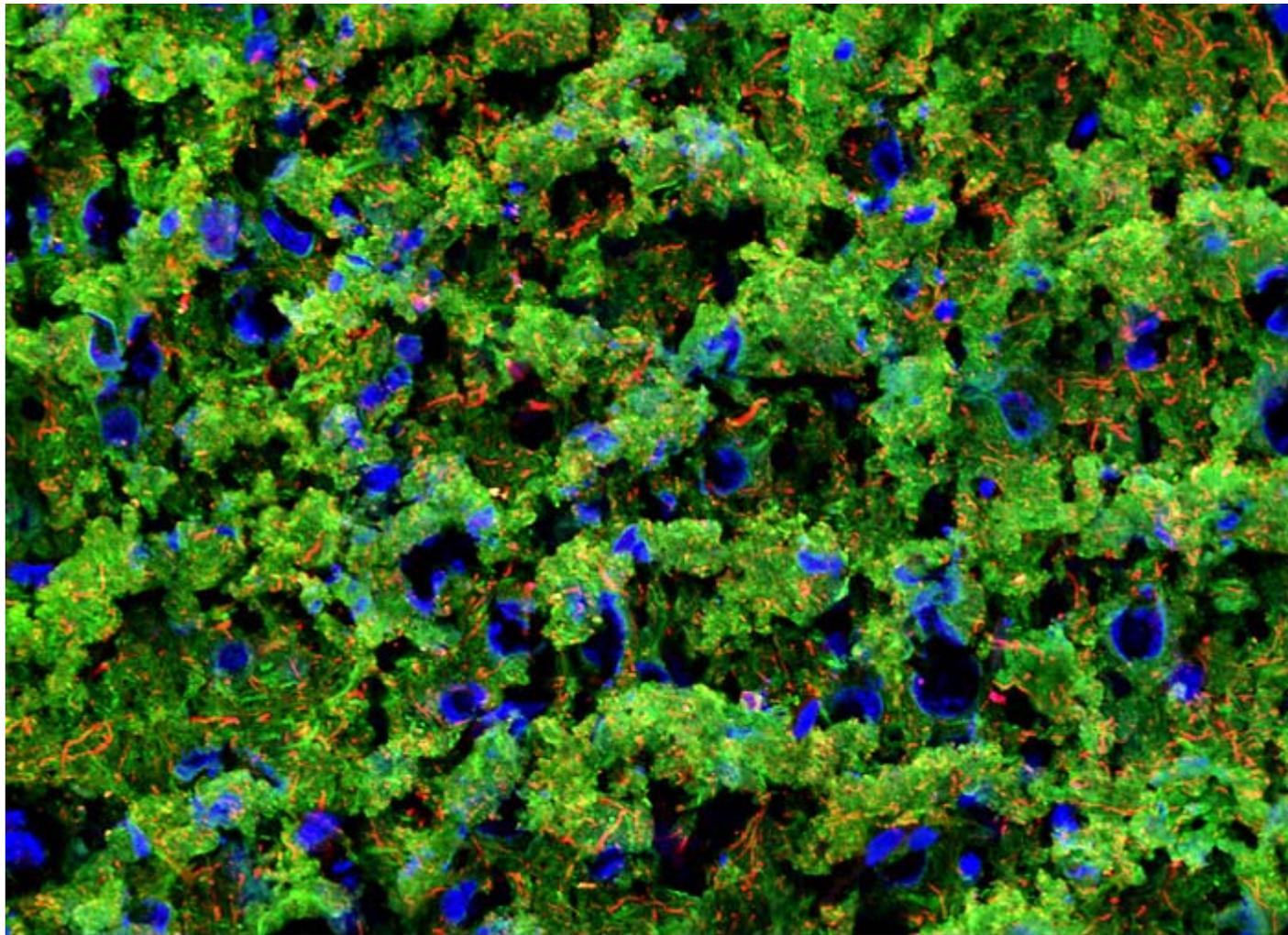
La risoluzione spaziale si può aumentare molto misurando la luce emessa dal campione in seguito all'assorbimento simultaneo di due fotoni con energia nella gap-proibita, invece che di un fotone con energia maggiore della gap. A due fotoni la regione eccitata è quella in cui è grande il quadrato dell'intensità del laser di eccitazione, ed è considerevolmente più piccola della regione eccitata ad un fotone (vedi foto).



# Risoluzione massima



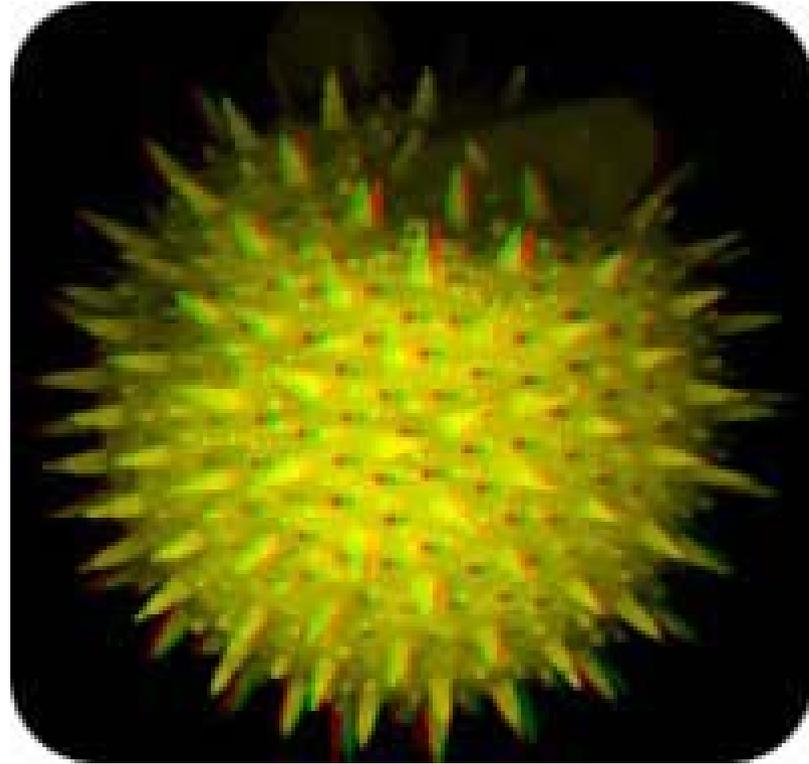
# Qualche esempio



Tessuto cerebrale di un topo



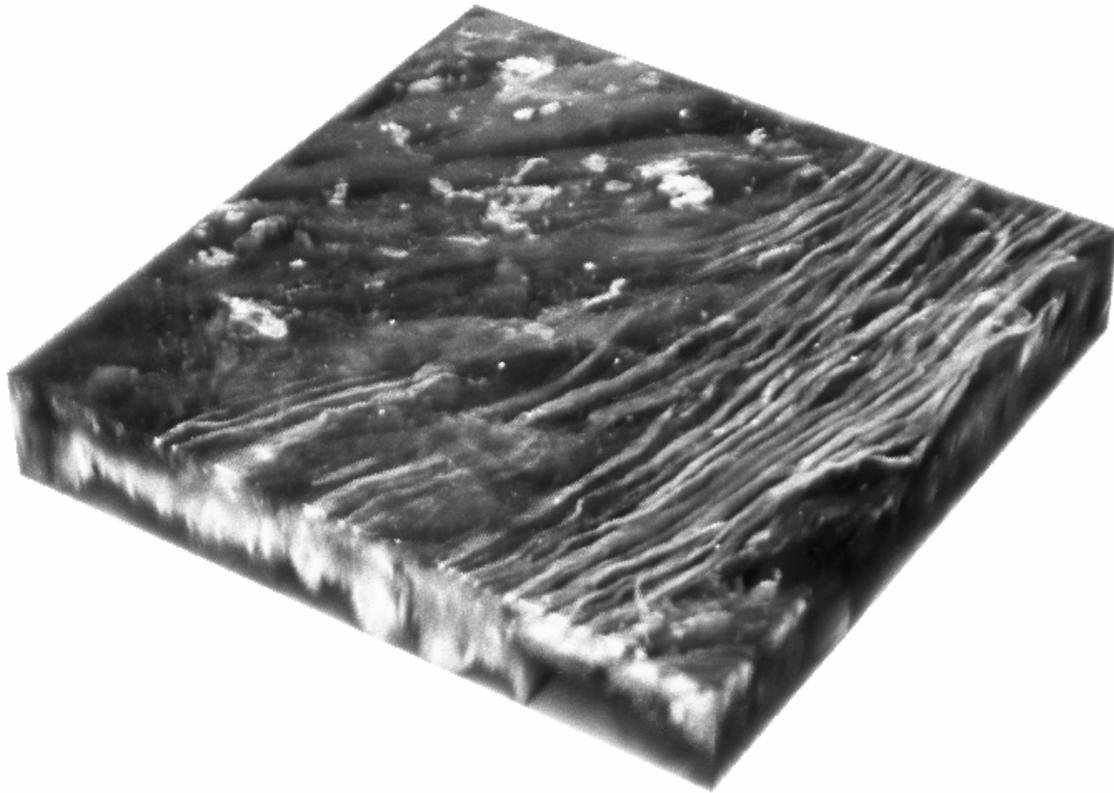
# Polline



La sensibilità lungo z consente di ricostruire immagini 3D (destra) partendo da diverse sezioni ad una data profondità (come quella di sinistra)



# Immagine 3D di Collagene



# Dimensioni e costi



Microscopio tradizionale 10 k€

Microscopio a fluorescenza 20 k€

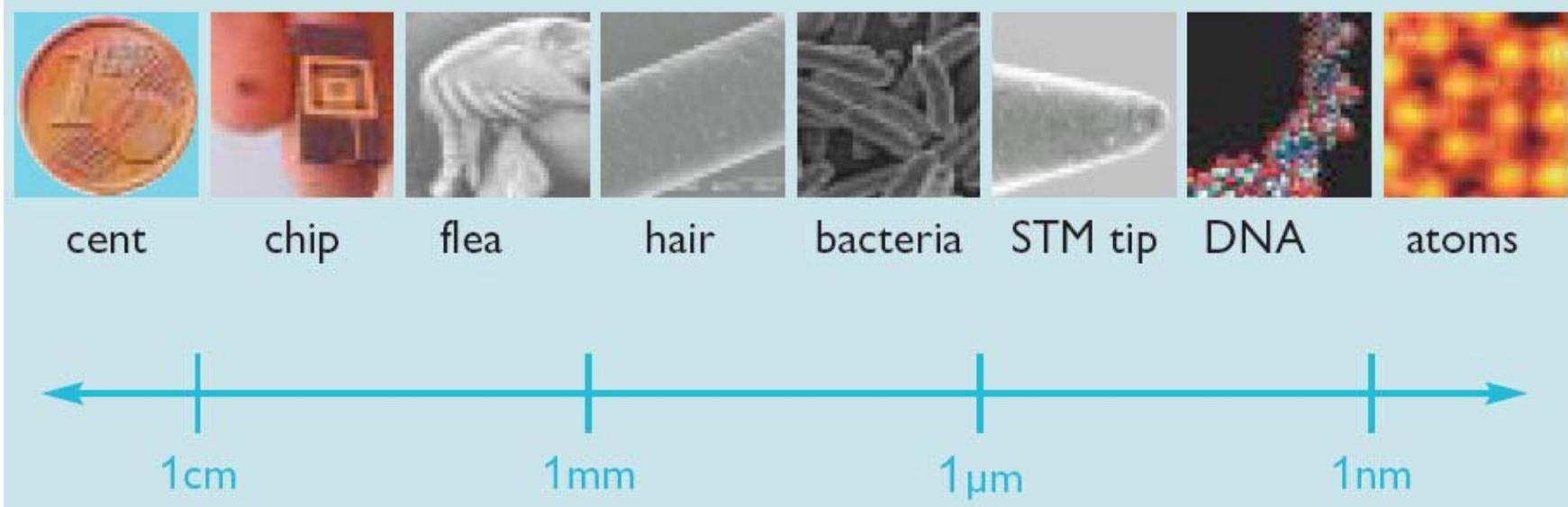
Microscopia confocale 250k€

Risoluzione della microscopia ottica sulla  
scala di centinaia di nanometri



1 tera	$10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000$
1 giga	$10^9 = 1\ 000\ 000\ 000$
1 mega	$10^6 = 1\ 000\ 000$
1 kilo	$10^3 = 1\ 000$
1	$10^0$
1 milli	$10^{-3} = 0.001$
1 micro	$10^{-6} = 0.000001$
<b>1 nano</b>	<b><math>10^{-9} = 0.000000001</math></b>
1 pico	$10^{-12} = 0.0000000000001$

**Sezione di un capello : 50 000 nm**  
**Sezione di un batterio: 100-200 nm**  
**Distanza interatomica in un cristallo: 0.5 nm**  
**Atomo di Idrogeno: 0.05 nm**  
**Raggio classico dell'elettrone:  $2.82 \cdot 10^{-15}$  m**  
***Lunghezza di Planck (la più piccola dimensione ipotizzata nell'universo):  $10^{-35}$  m***



[www.cordis.lu/nanotechnology](http://www.cordis.lu/nanotechnology).



## *Come appare il mondo a diverse scale di lunghezza*



- 1 meter

source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>





- 10 centimeters

source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>

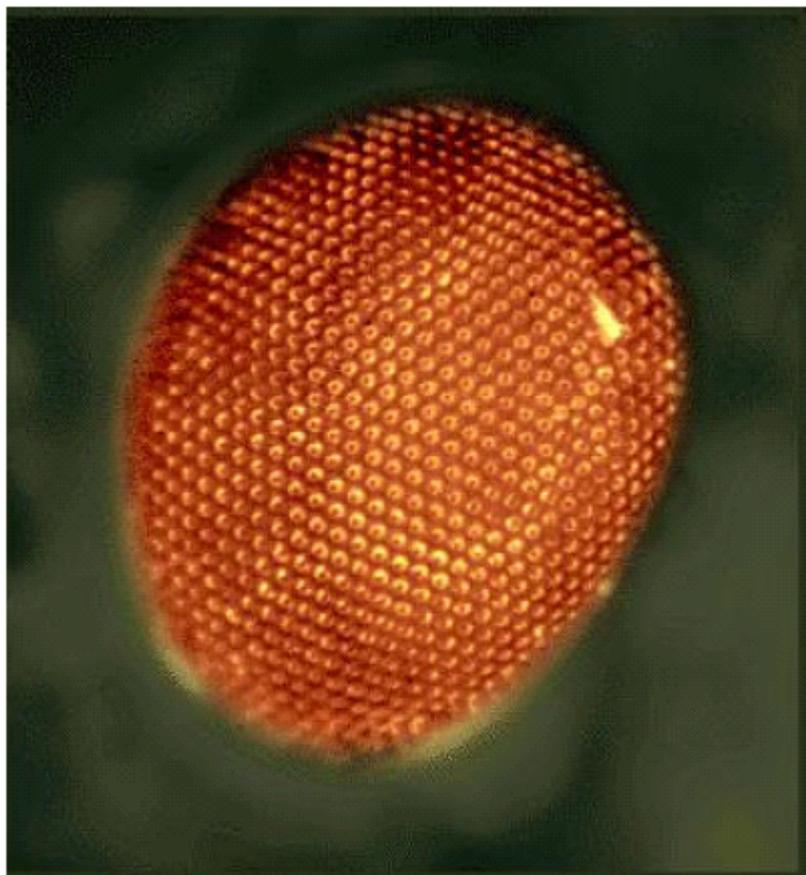


- 1 centimeter



source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>

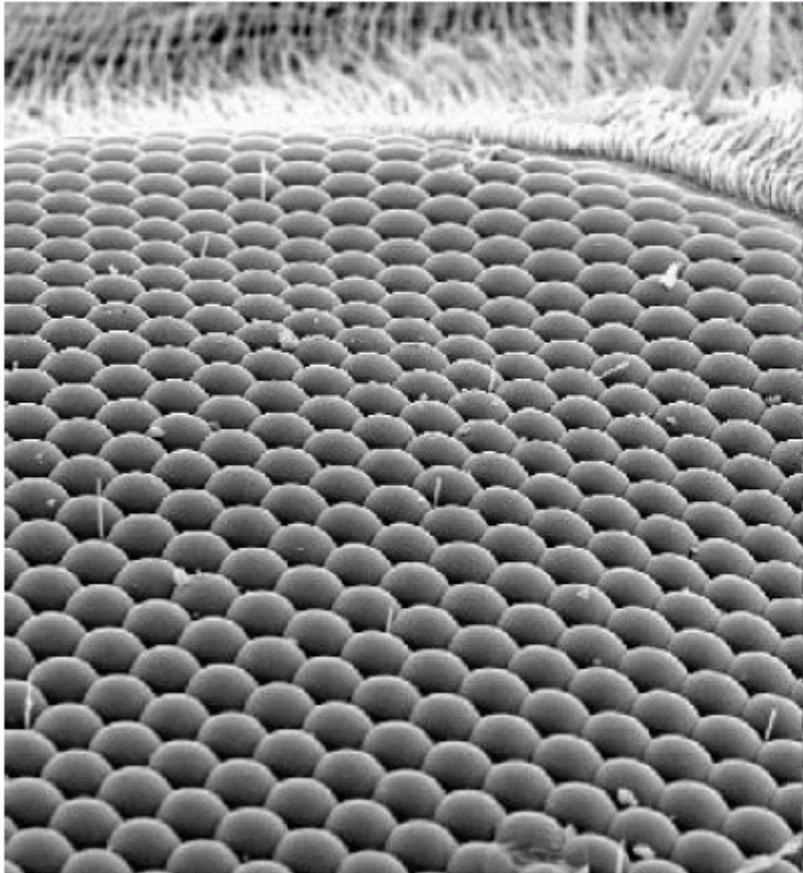




- 100 micrometers

source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>

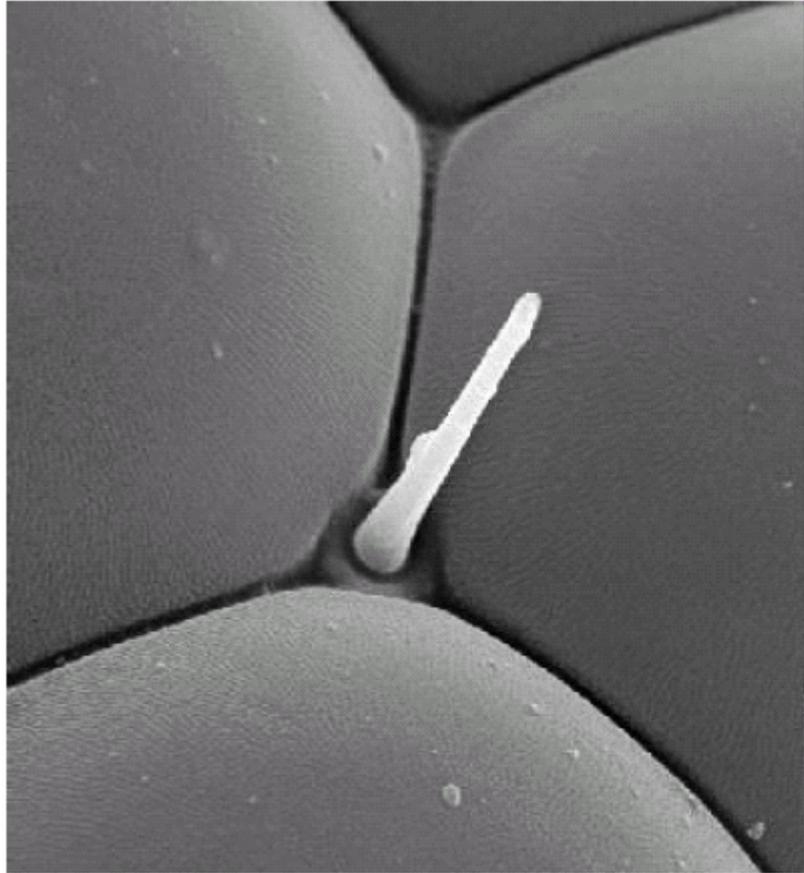




- 10 micrometers

source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>

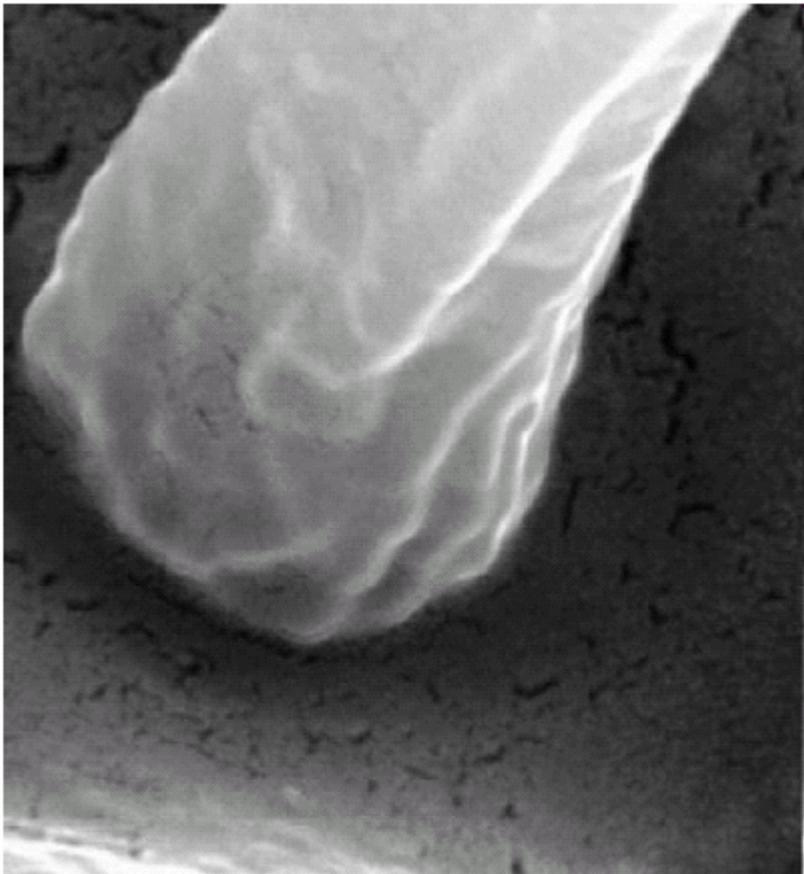




- 1 micrometer

source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>

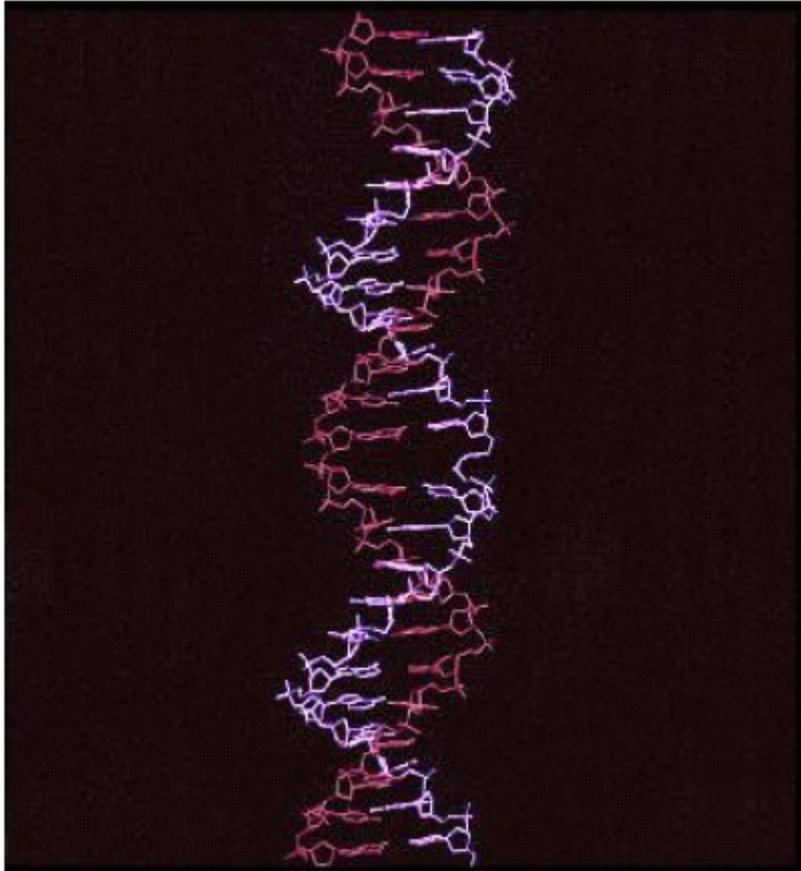




- 100 nanometers

source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>

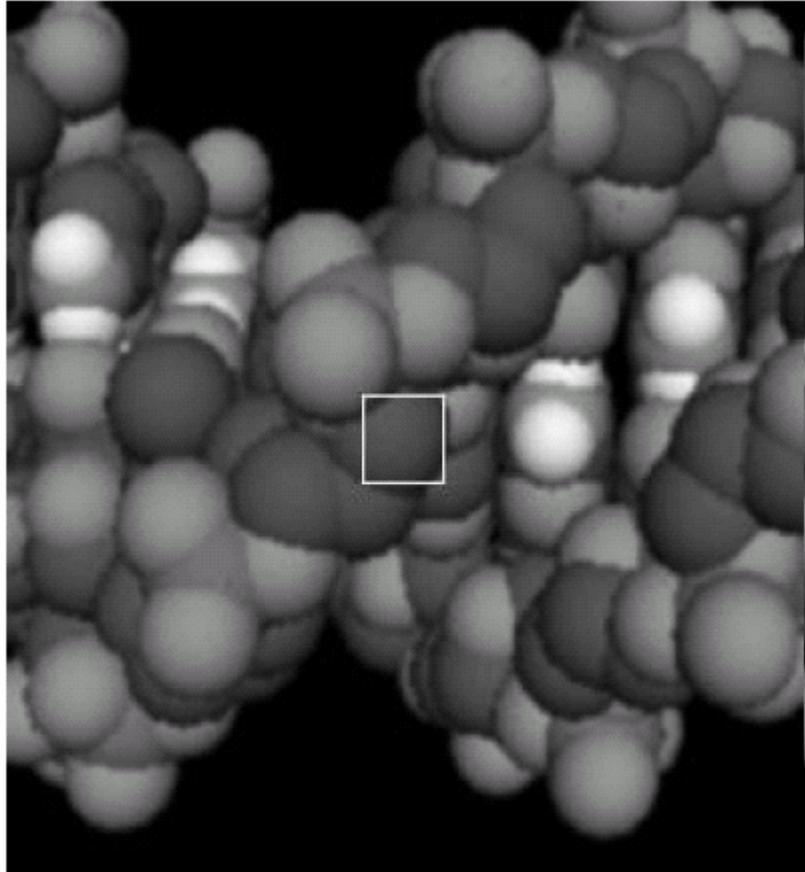




- 10 nanometers

source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>





- 1 nanometer

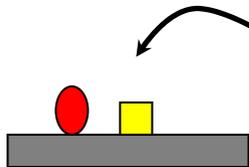
source: CERN <http://microcosm.web.cern.ch/microcosm>



Se si vogliono ottenere informazioni microscopiche di sistemi più piccoli di qualche centinaia di nanometri non si possono utilizzare microscopi ottici, perché non hanno la risoluzione spaziale sufficiente. Data la grande quantità di sistemi interessanti più piccoli di 100 nm questo limite è pesante. Vediamo come si supera



La risoluzione di un microscopio ottico (il piccolo dettaglio che può essere distinto) è dato da :



$$\Delta x = 0.61 \frac{\lambda}{n \times \sin \Theta} \approx \frac{\lambda}{2} \approx 250 \text{ nm}$$

Il limite di risoluzione intorno alle poche centinaia di nanometri deriva dal valore della lunghezza d'onda della luce visibile.

E' anche noto però che le particelle microscopiche si muovono con proprietà ondulatorie, con lunghezza d'onda data dalla relazione di De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

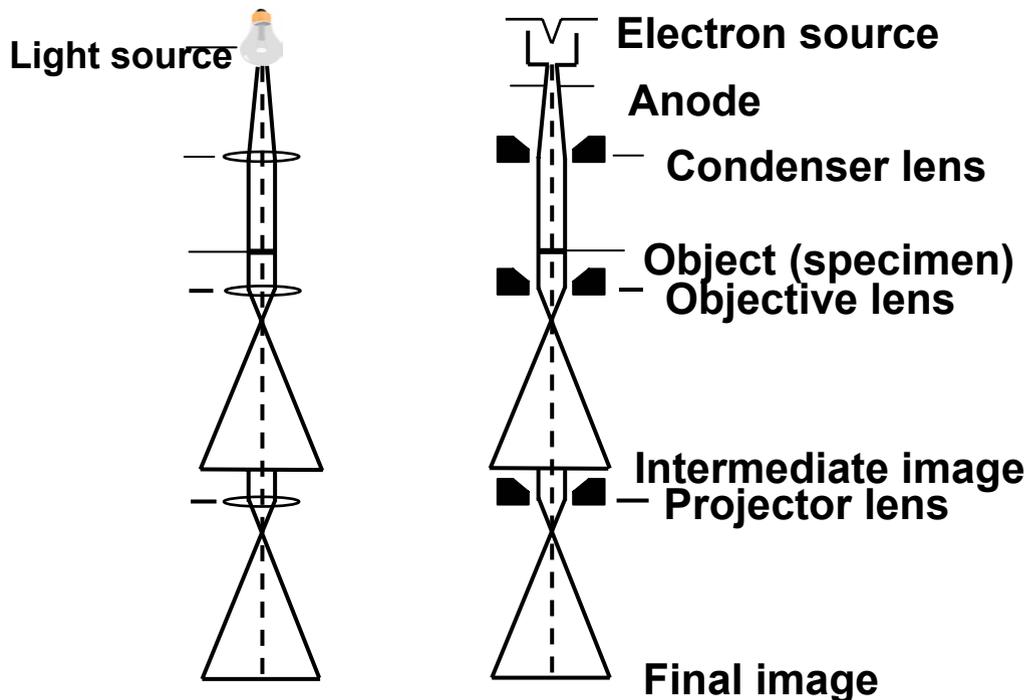
Questa lunghezza d'onda può essere ben più piccola di quella della luce visibile. Ad esempio la lunghezza d'onda di De Broglie di un elettrone di energia 100 eV è di circa 0.1 nm



# Microscopio elettronico (Ernst Ruska 1931); Nobel per la fisica nel 1986



## Analogia tra microscopio ottico e microscopio elettronico



### VANTAGGI

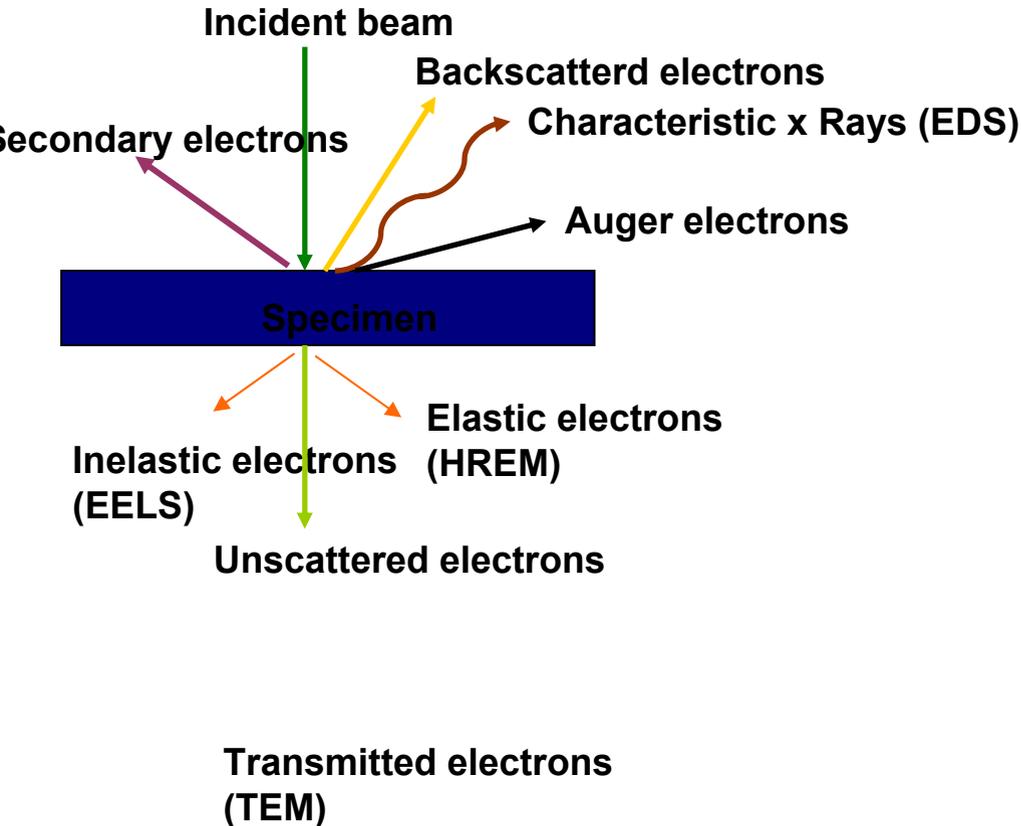
- Elevata risoluzione spaziale  $< 2\text{\AA}$
- Sensibilita' alla composizione chimica
- Tecnica diretta

### SVANTAGGI

- Preparazione dei campioni: tempi lunghi e possibile introduzione di artefatti
- Costi elevati
- Interpretazione non banale del contrasto delle immagini: necessita' della simulazione



# Microscopio elettronico: le tecniche



**La risoluzione dipende dalla velocità degli elettroni**

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

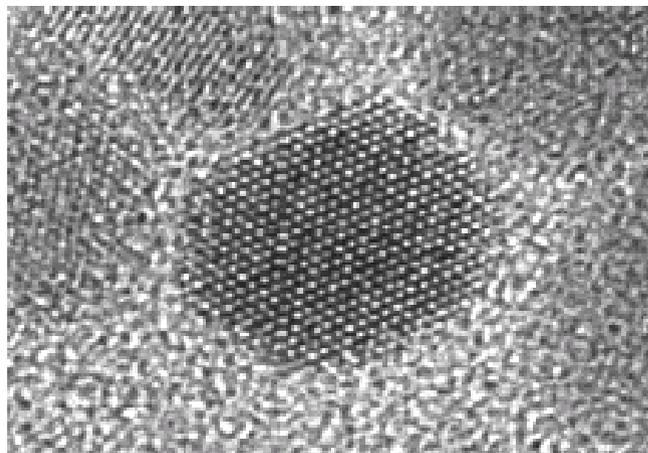


Tensione di Accelerazione (kV)	Lunghezza d'onda (Å)
100	0.037
200	0.0251
400	0.0164

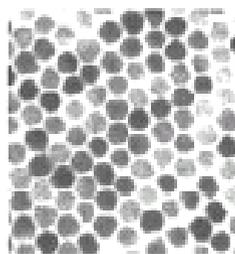


# Qualche risultato....

Nanocristalli di CdSe

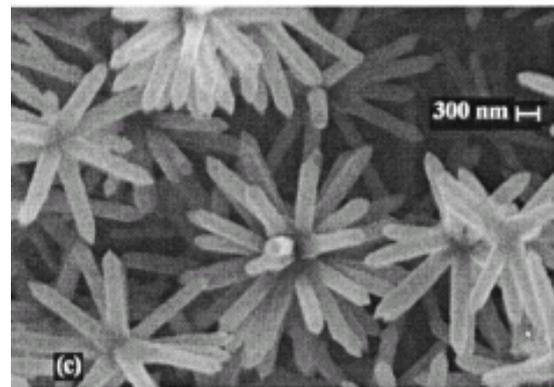
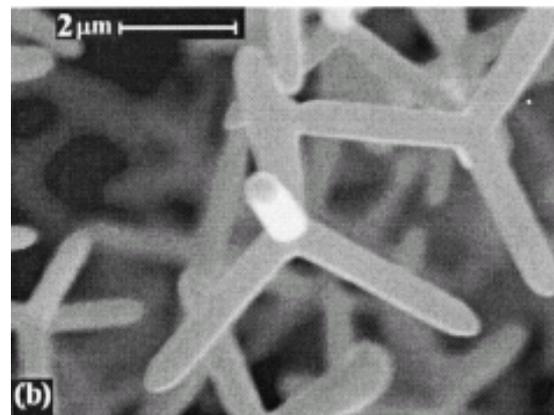
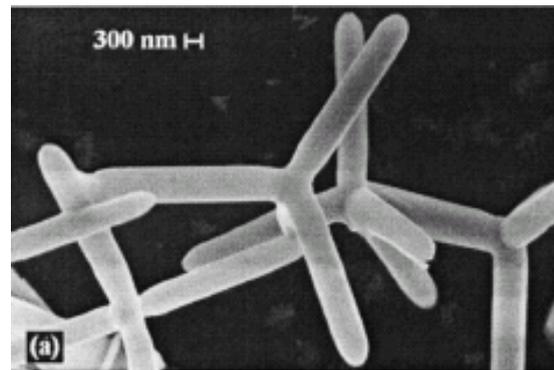


5 nm

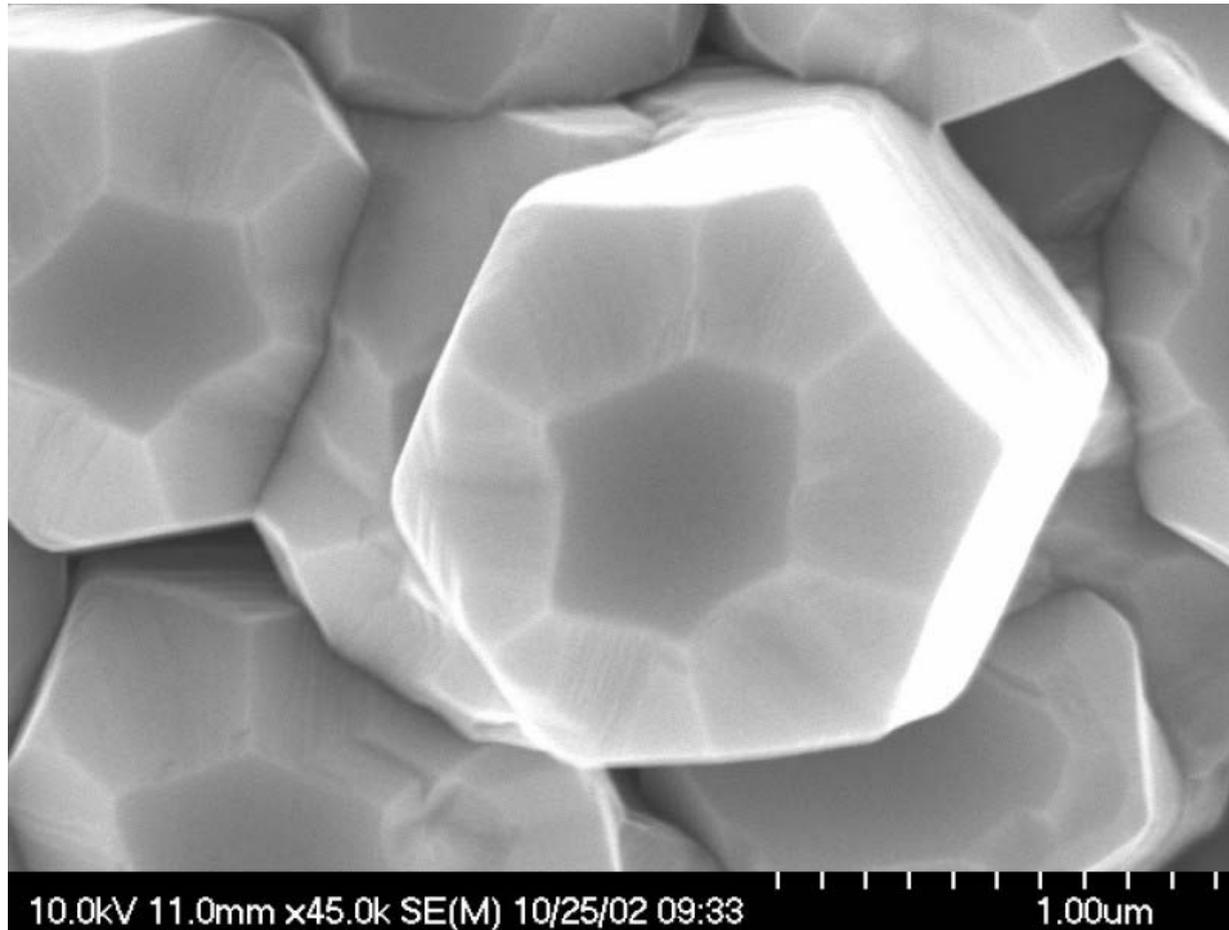


50 nm

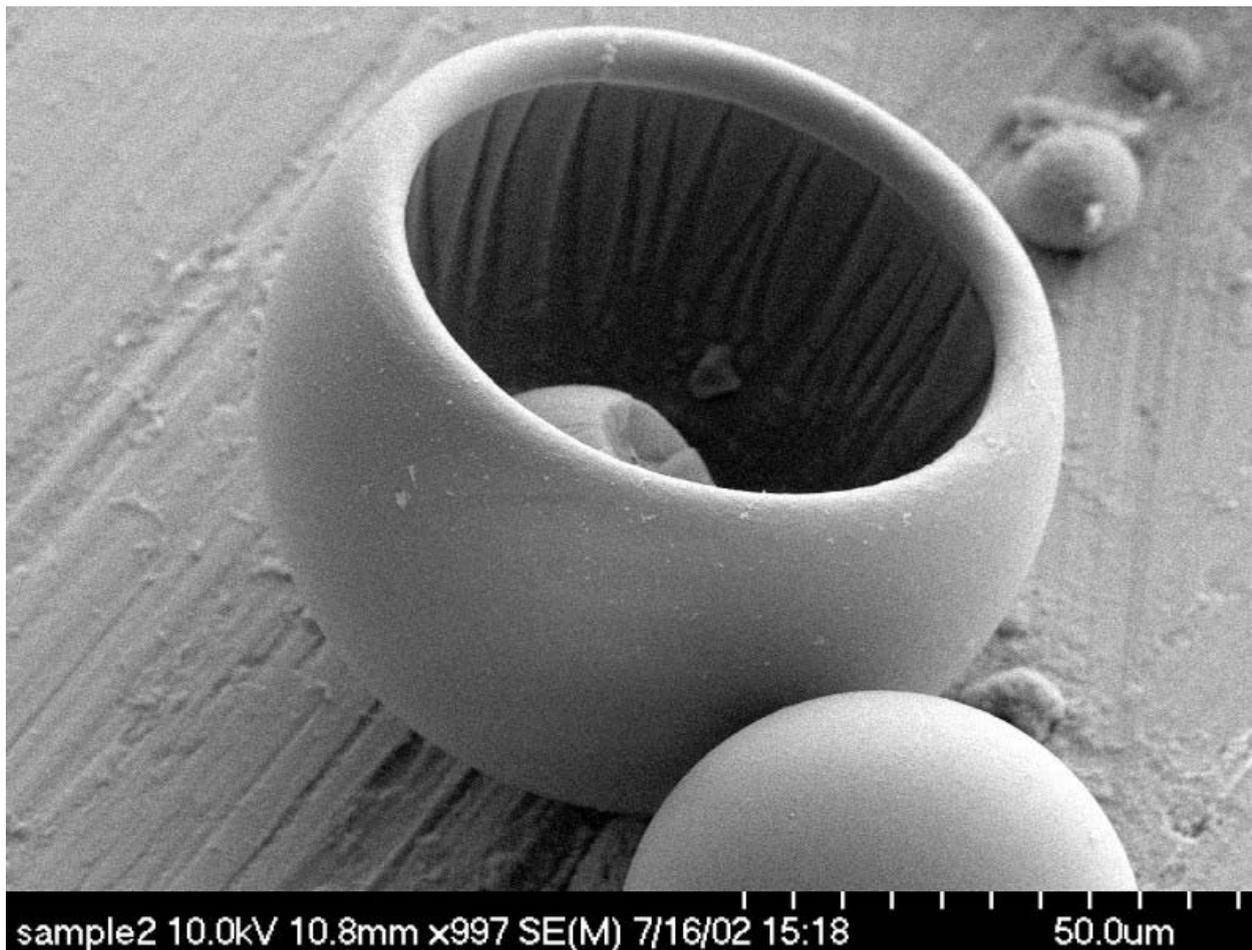
Nanocristalli di ZnO



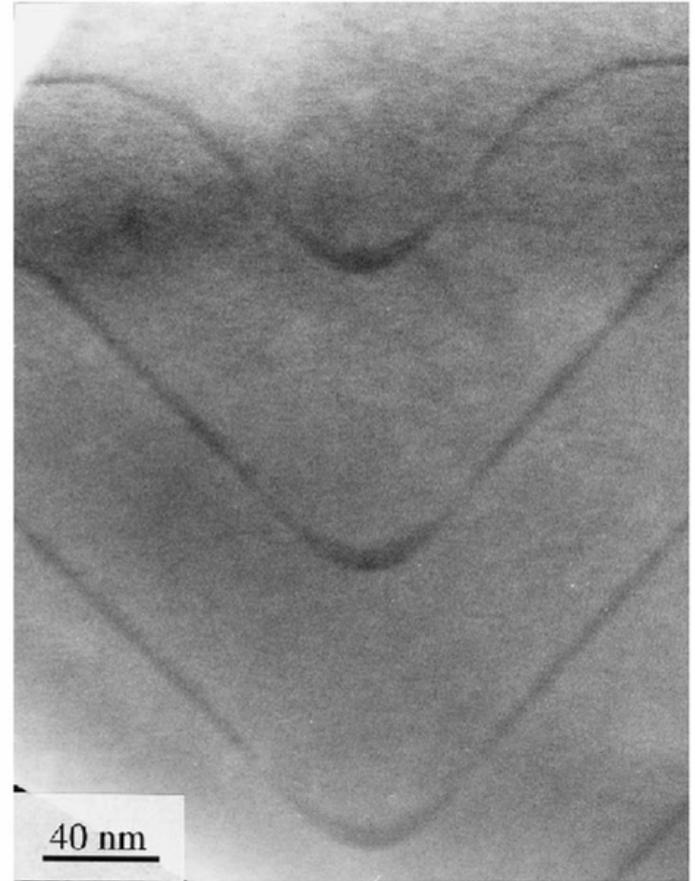
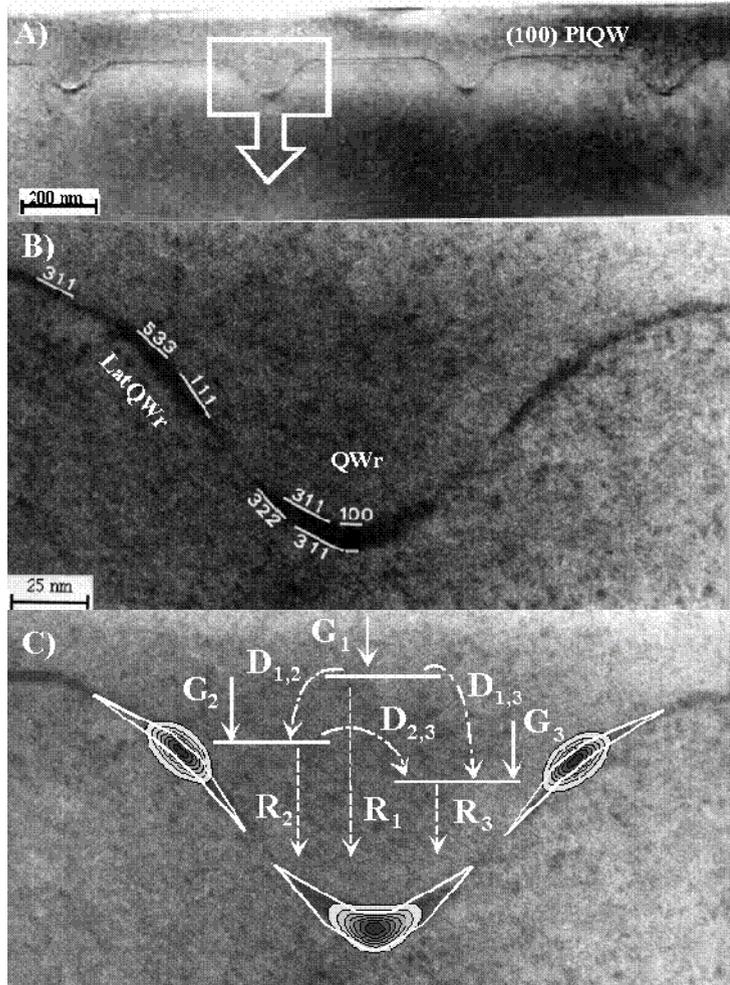
Ancora ZnO microstrutturato, si vedono distintamente le diverse orientazioni delle facce cristalline



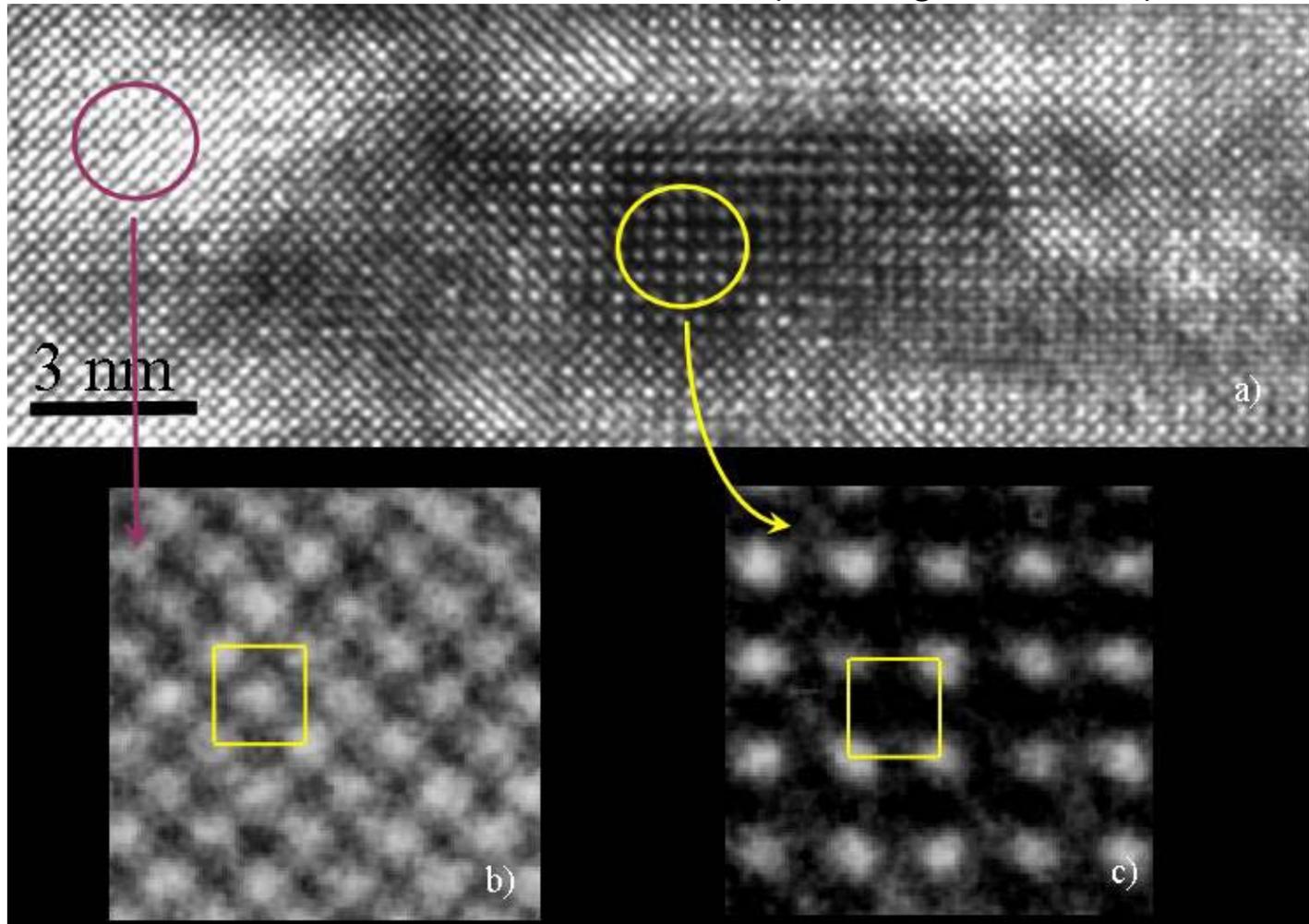
# Microsfere polimeriche



# Multistrati di semiconduttori differenti



Un cluster di un semiconduttore cresciuto in una matrice di un materiale diverso. I singoli “puntini” sono gli atomi dei due materiali. Si distingue anche la diversa geometria cristallina del cluster e della matrice (vedi ingrandimenti)



# Dimensioni e costi



Bassa risoluzione 200 kV  
Risoluzione atomica 1M

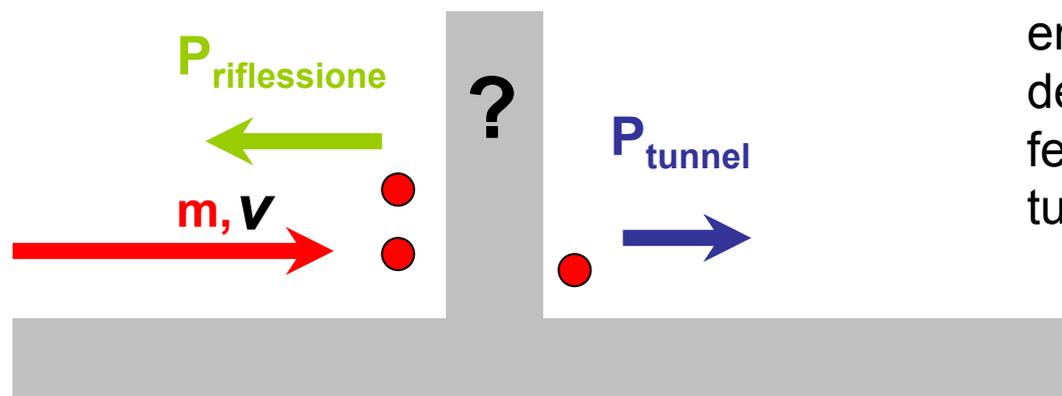
Dove:

SEM a bassa risoluzione  
presente nel Dip. di Ingegneria  
SEM e TEM ad alta risoluzione  
presenti nel CNR-IMM di Lecce

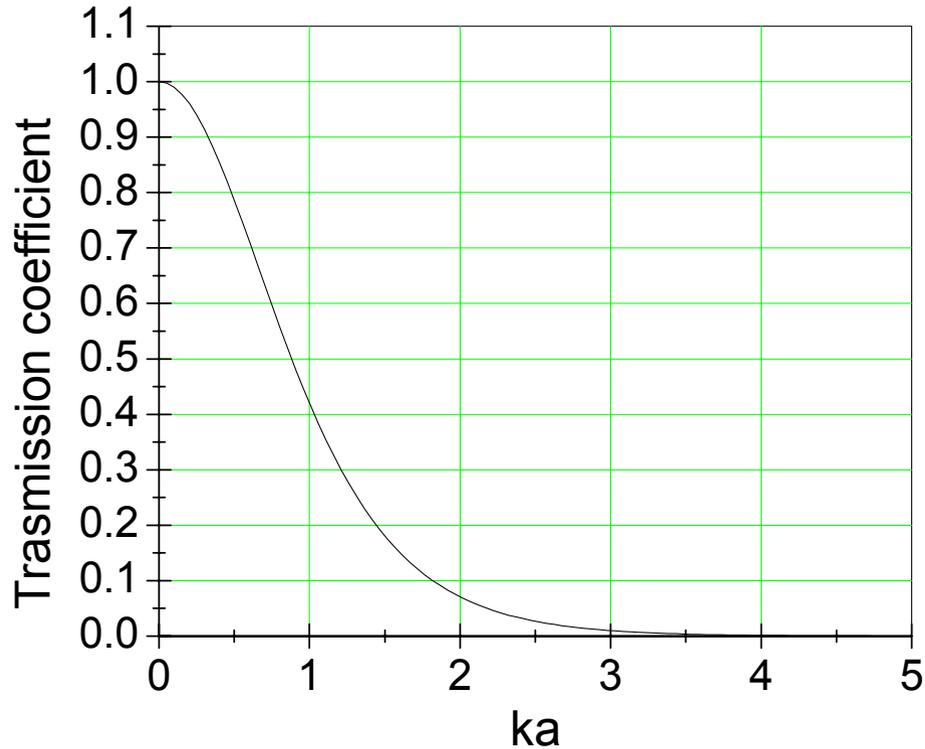


# Applicazioni dell'effetto tunnel alla microscopia

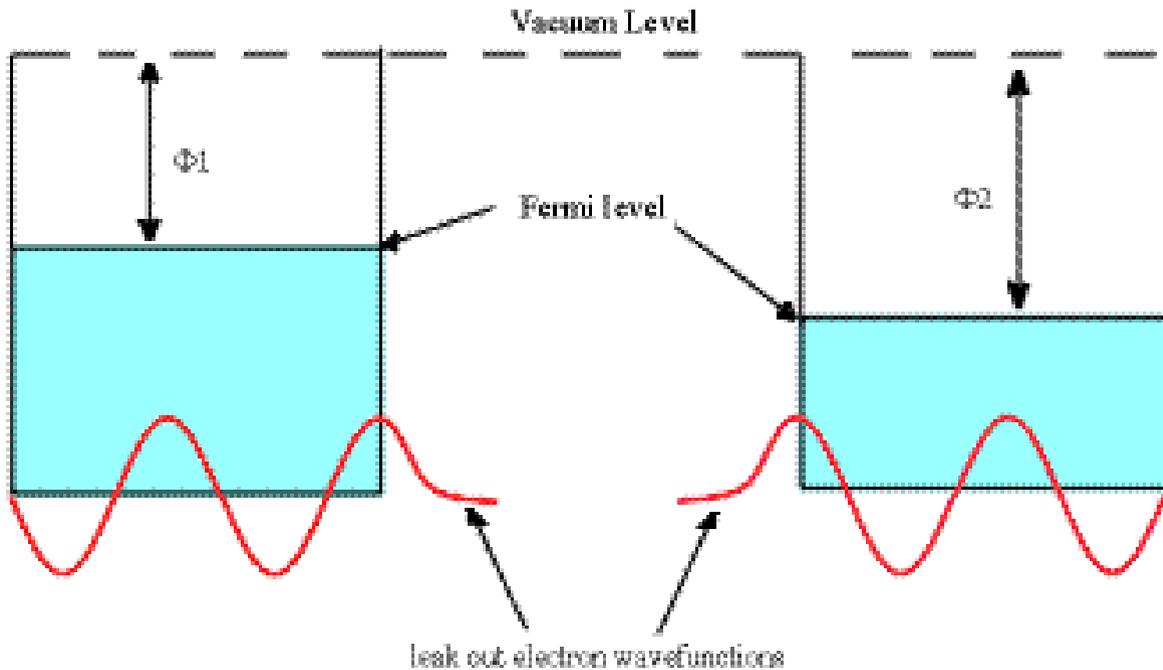
L'idea di partenza: In meccanica quantistica una particella interagente con una barriera di potenziale la può attraversare anche se ha energia minore dell'altezza della barriera. Questo fenomeno si chiama effetto tunnel.



La probabilità di tunnelling decresce esponenzialmente al crescere dello spessore della barriera di potenziale  $a$ .



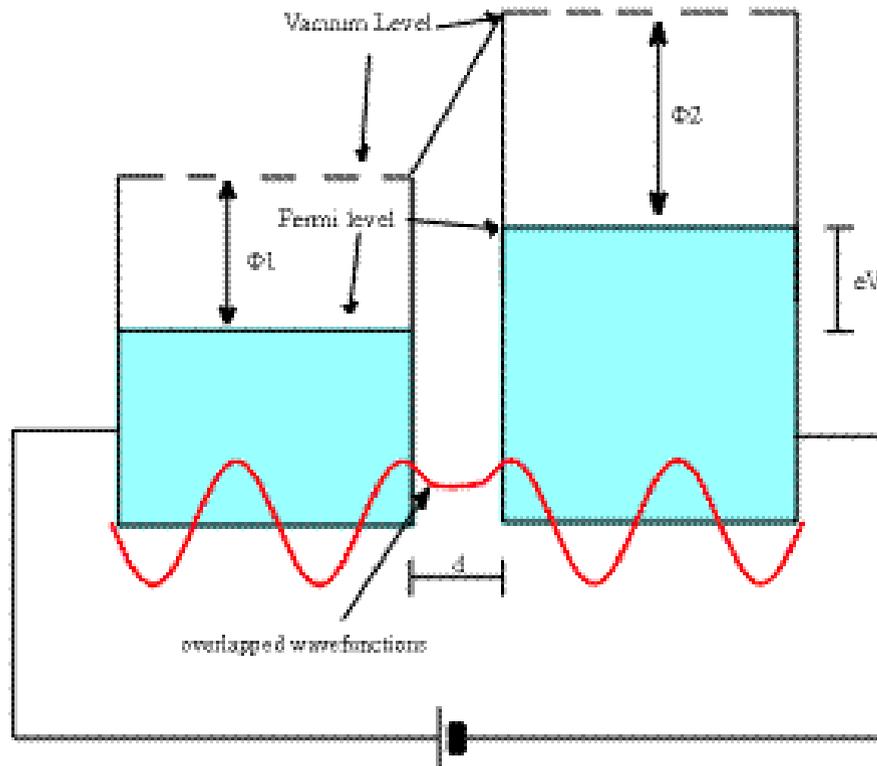
# Come si fa ad avere effetto tunnel in sistemi reali



Nei materiali metallici gli elettroni (a  $T=0$  K) occupano tutti gli stati fino al livello di Fermi, lasciando vuoti quelli ad energia più alta. La distanza tra il livello di Fermi e il livello di vuoto (elettrone libero) dipende dal materiale.



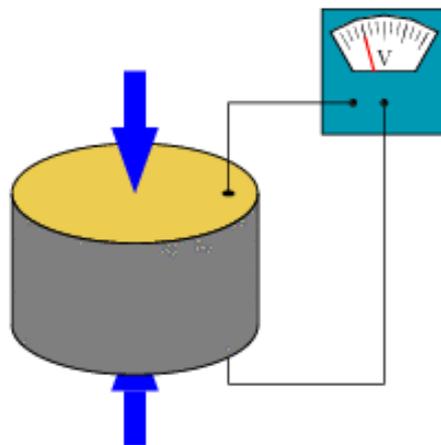
Applicando una differenza di potenziale tra i due materiali gli elettroni più energetici nel materiale di destra si trovano ad energie in cui ci sono stati vuoti nel materiale di sinistra. I due materiali sono separati di  $d$ , e questa spaziatura rappresenta una barriera di potenziale che ostacola il trasferimento di elettroni. Gli elettroni possono però attraversare la barriera per effetto tunnel, generando una corrente misurabile. Visto che tale corrente dipende dal numero di elettroni che attraversano la barriera, e quindi dal coefficiente di trasmissione  $T$ , la corrente dipende fortemente da  $d$ , a causa della forte diminuzione di  $T$  al crescere di  $d$ .



# Qualche numero

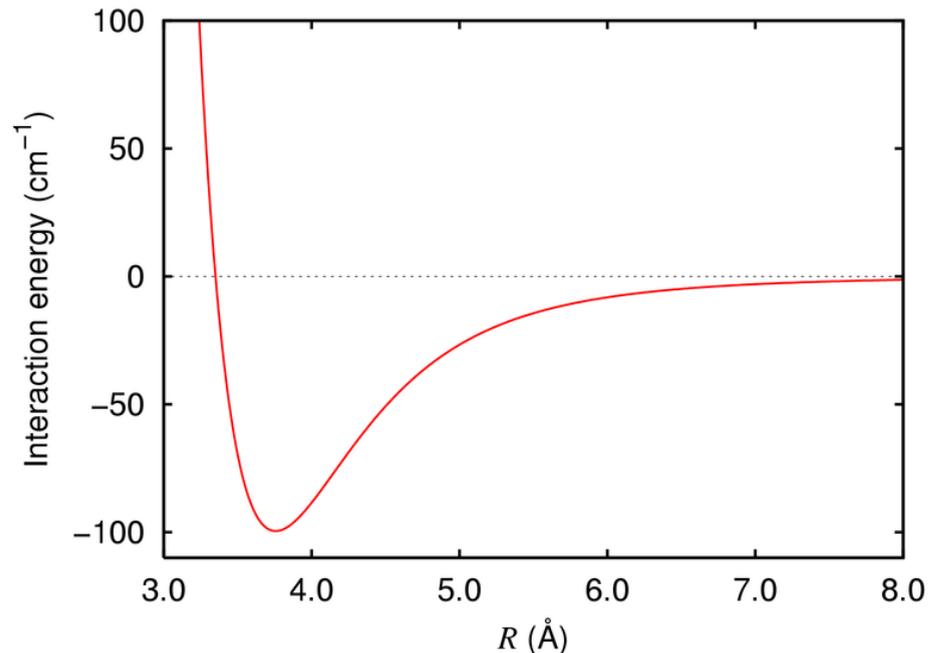
Per differenze di potenziale di qualche volt tra i due metalli  $k \sim 10^{10} \text{ m}^{-10} \Rightarrow$  la gap deve essere dell'ordine dell'Angstrom

Per controllare la posizione con questa precisione si usa l'effetto piezoelettrico



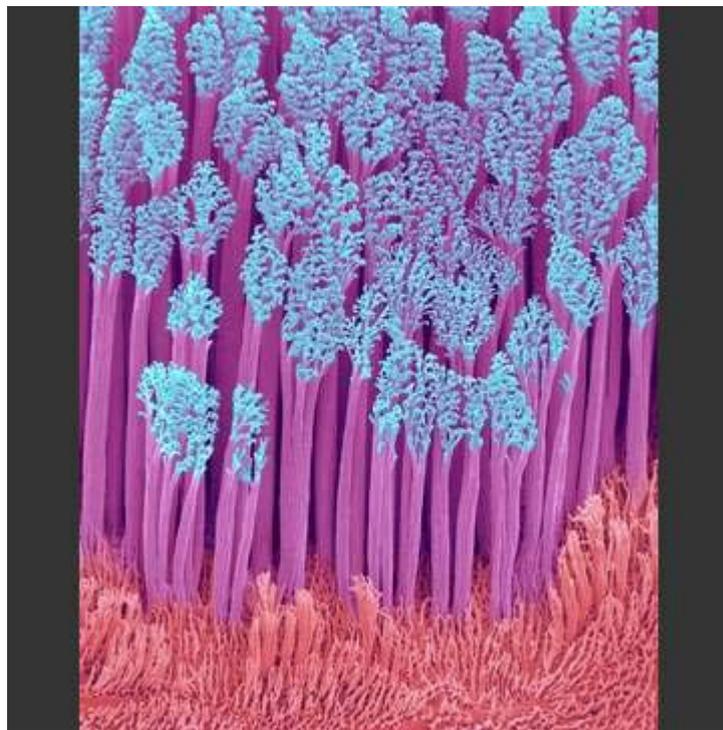
Per avvicinare la punta a qualche Angstrom dal campione serve qualche interazione punta-campione che sia fortemente variabile su questa scala di distanza

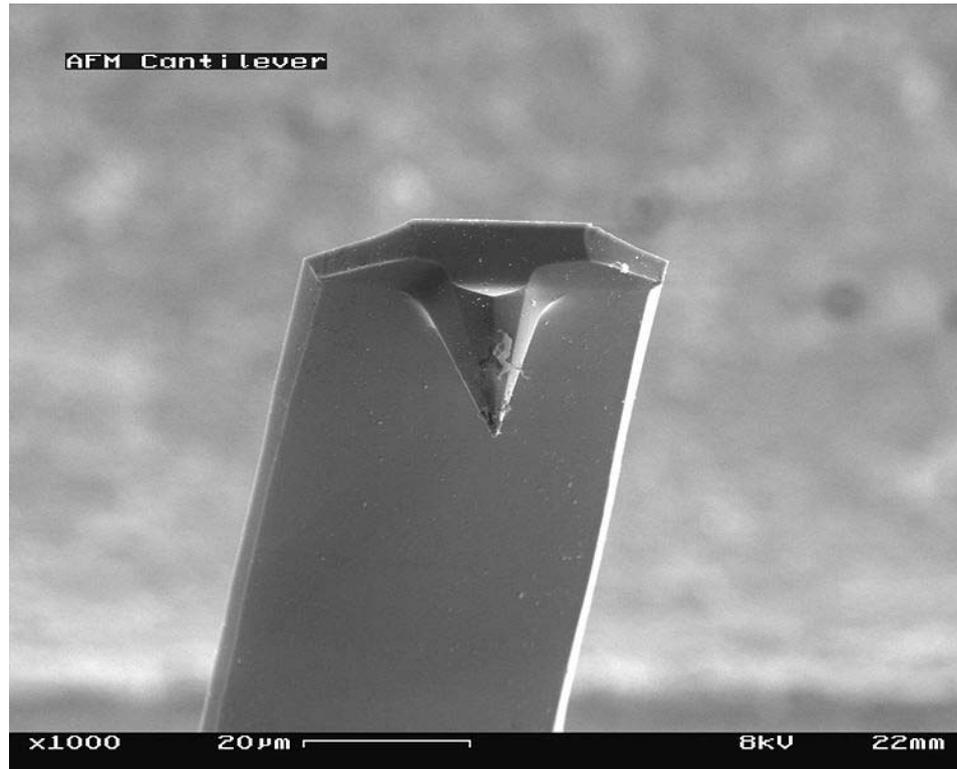
A distanza di pochi Angstrom tutti i sistemi materiali si attraggono a causa della debole attrazione dipolo-dipolo di Van der Waals



La somma di deboli interazioni di Van del Waals porta a forte adesione su scala microscopica, come per le zampe dei gechi

copyright (c) 2006 Kellar Autumn

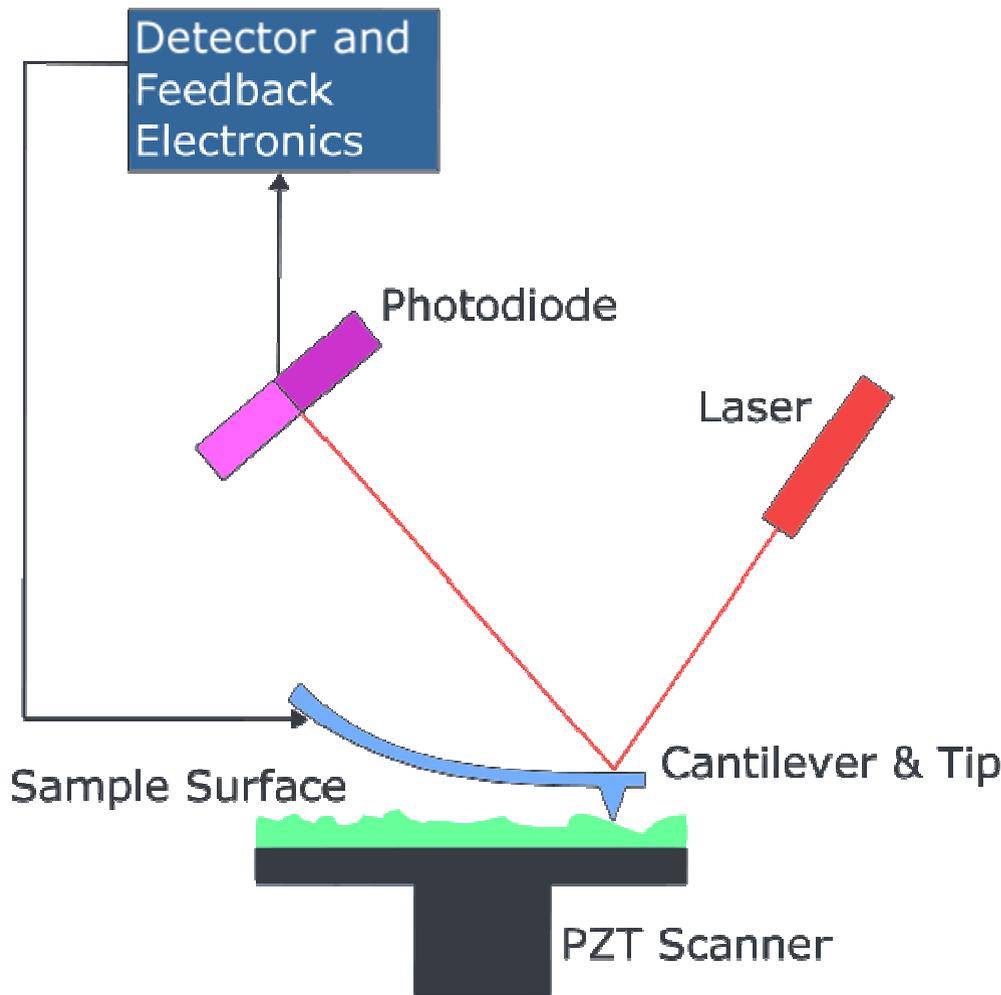




Per avvicinare la punta del microscopio al campione la si fissa su una levetta elastica (cantilever), la cui distanza dal campione è determinata da motorini piezoelettrici.

La capacità di misurare la forza tra punta e campione consente di fissare la distanza

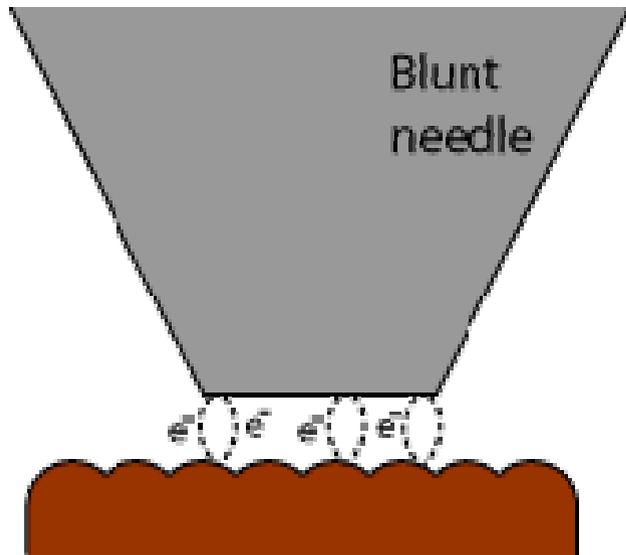




L'entità della deflessione del cantilever, dovuta alla forza di Van der Waals, viene misurata tramite un laser, inviato sulla punta del cantilever. Un fotodiode sensibile alla posizione di incidenza del laser riflesso consente di determinare l'angolo di deflessione.

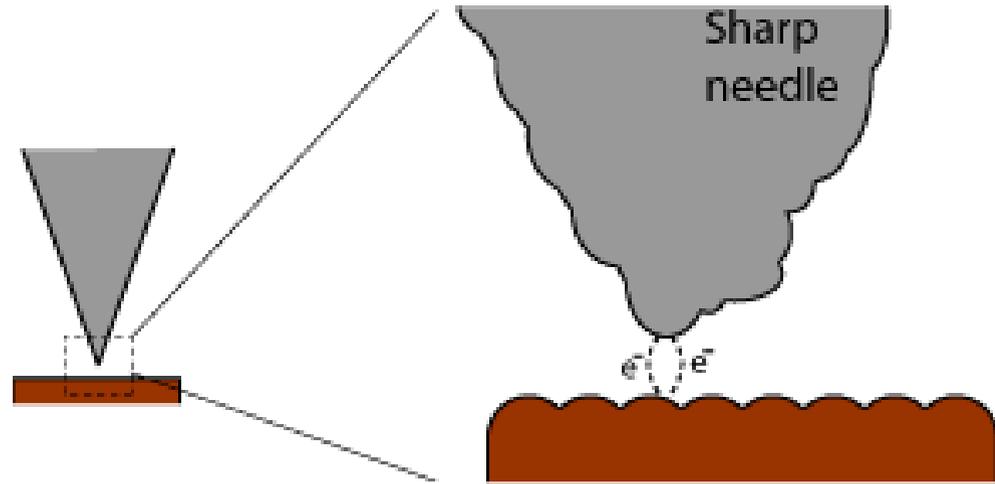


Per avere alta risoluzione laterale uno dei due materiali deve essere sotto forma di punta molto assottigliata



Surface

Bassa risoluzione laterale

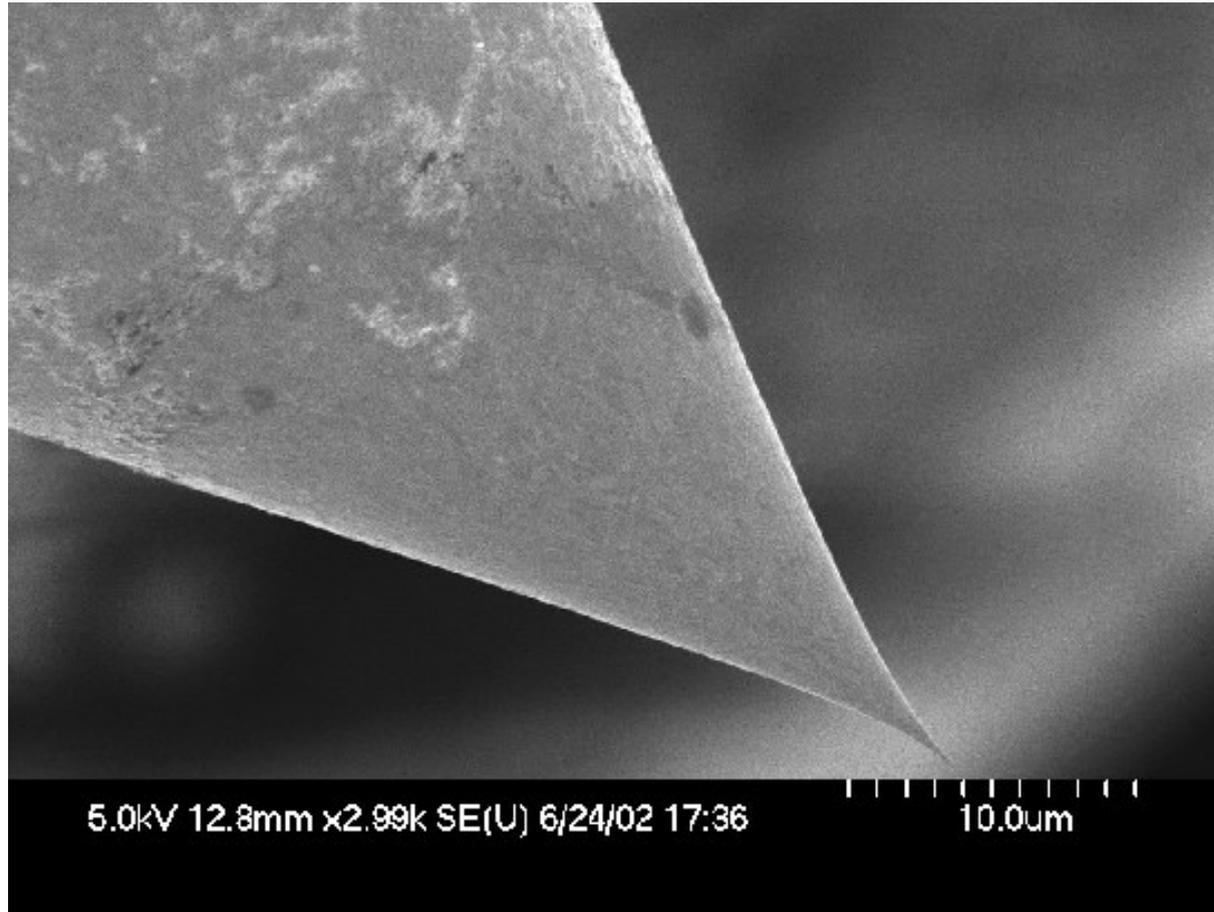


Surface

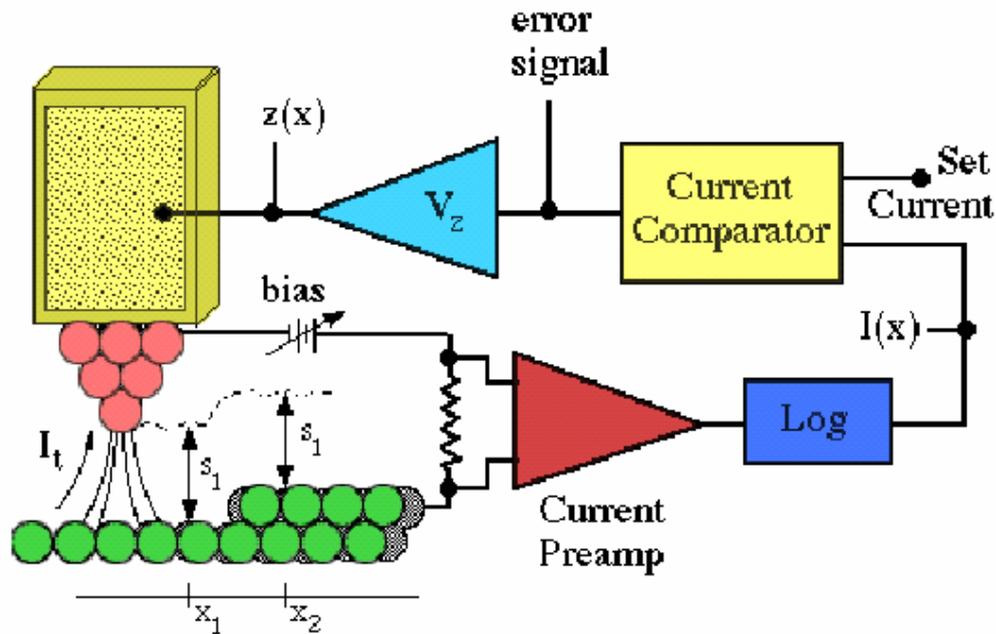
Alta risoluzione laterale



# Tipica punta di uno Scanning Tunnelling Microscope



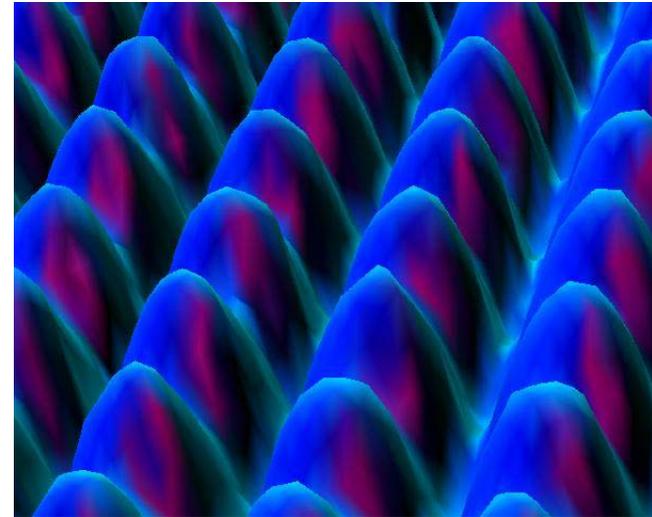
## II Microscopio a Scansione at effetto Tunnel (STM)



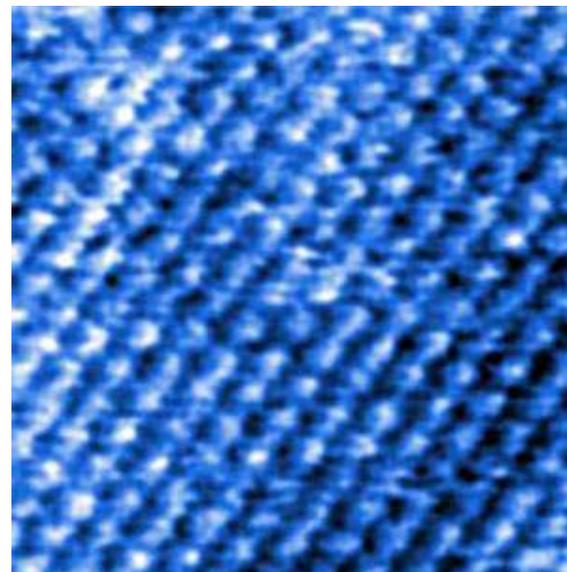
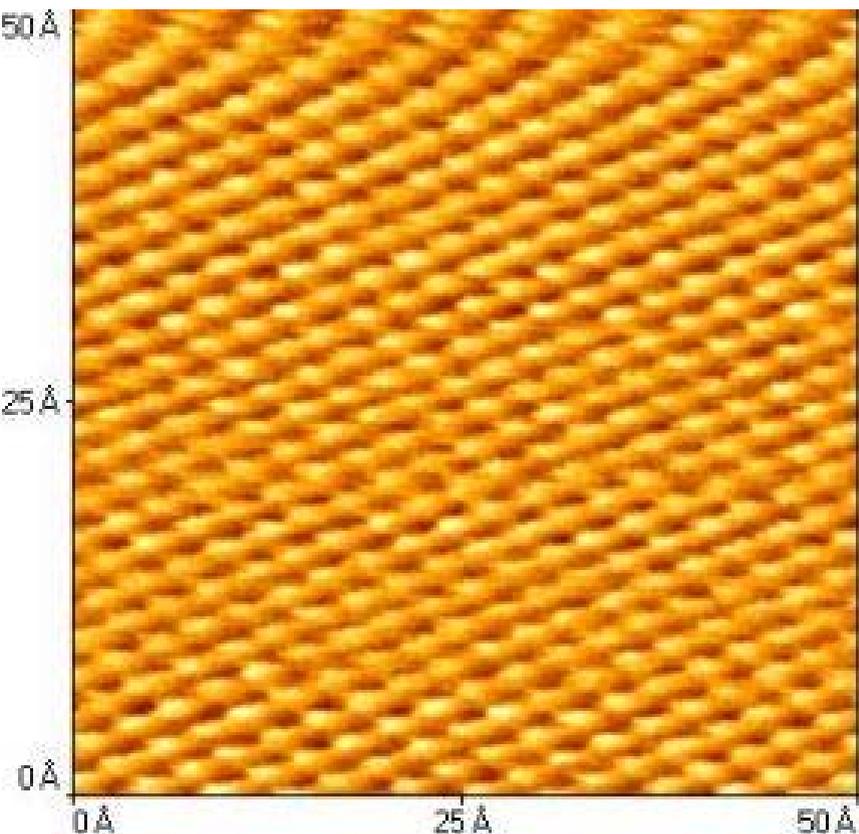
Struttura schematica di un STM

- ***E' sensibile alla morfologia***
- ***Alle proprieta' elettriche locali***
- ***La risoluzione è atomica:***
- ***0.3 nm***

Atomi di nichel su ferro



# Qualche esempio



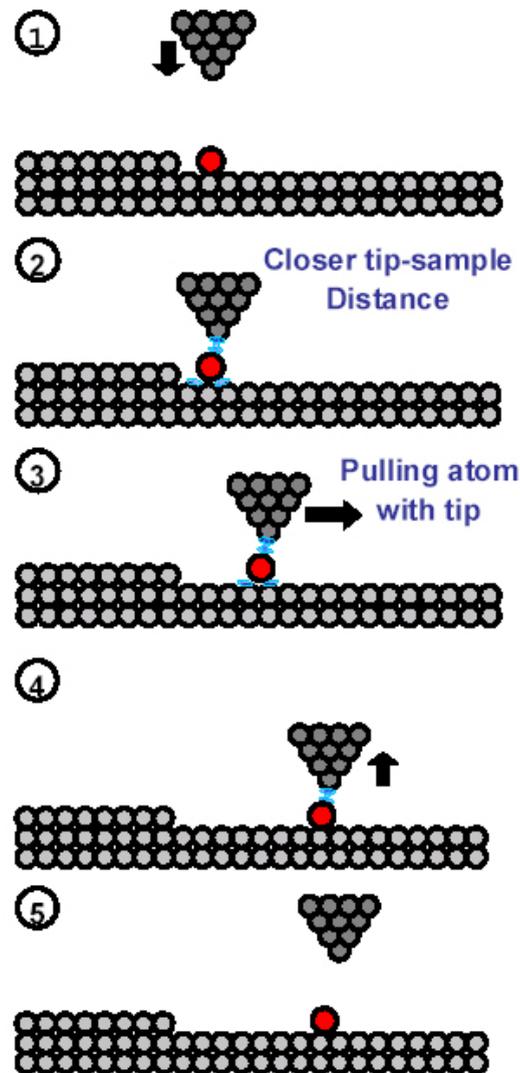
Morfologia in risoluzione atomica della grafite (sinistra) e del NaCl (destra)



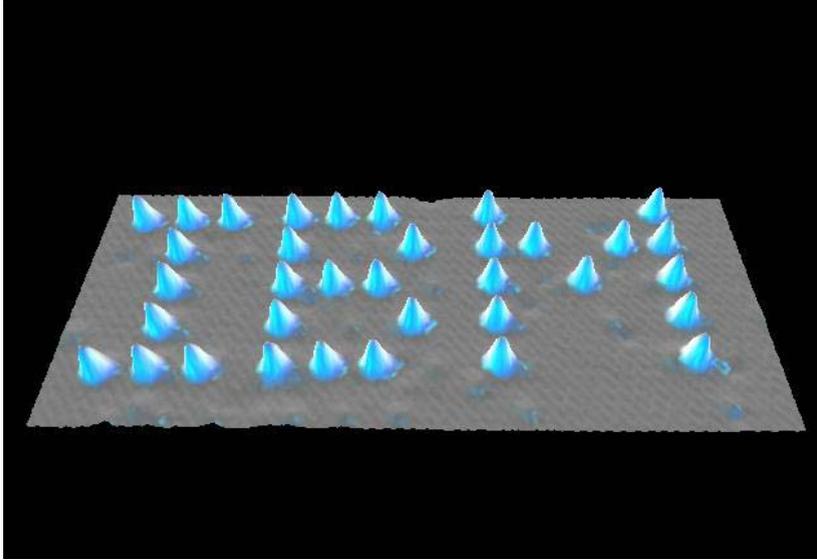
# Manipolazione su scala atomica

La possibilità di interagire con i singoli atomi rende fattibile (idealmente) la manipolazione di un atomo alla volta tramite lo schema in figura:

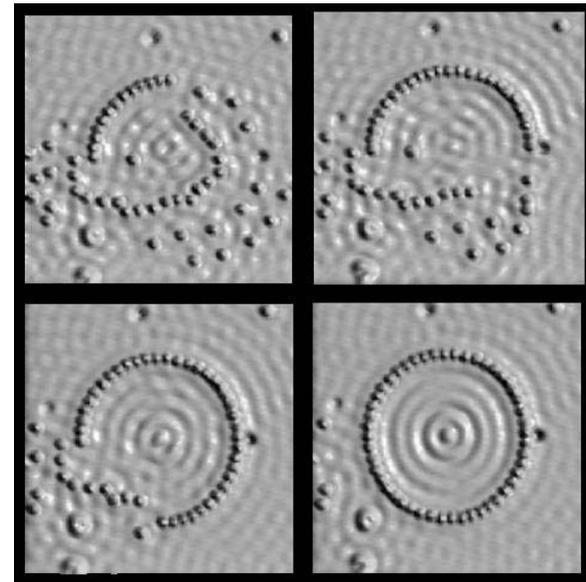
Si avvicina la punta all'atomo (1), si fa passare corrente legando l'atomo alla punta (2), tirandolo fino alla posizione finale (3), per poi lasciarlo li spegnendo la corrente (4) e allontanando la punta (5).



Questa tecnica funziona, come dimostrato dal logo IBM costituito da singoli atomi di Xenon spostati su una superficie di Nichel (110), e dal recinto di atomi di ferro su rame, assemblato progressivamente nella figura a destra in alto.



*Atomi di Xenon su Nichel (110)*



*Recinti quantistici: atomi di Ferro su Rame (111)*

