

NANO



MIKRO- ES NANOTECHNIKA II: NANOTECHNOLÓGIA

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

1. A NANOTECHNOLÓGIA ALAPJAI, BEVEZETŐ



2012/2013 1. félév

Nem-szerkesztett (ideiglenes) változat!

1

1. ELŐADÁS: A NANOTECHNOLÓGIA ALAPJAI, BEVEZETŐ

A *Mikro- és nanotechnika II* c. tárgy megkísérli áttekinteni a nanotechnika (*nanotechnológia, nanotudomány*) alapjait, főbb alkalmazásait, és a várható fejlődési irányokat.

Az előadások tematikájának kiválasztása meglehetősen szubjektív, erősen kötődik az előadó saját tapasztalataira, melyek főleg a félvezetők technológiája és tulajdonságai, mikroelektronika, és az ehhez kapcsolódó szilárdtestfizika és anyagtudomány területére esnek, intézményileg pedig az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézetéhez.

www.mfa.kfi.hu/int/nano

www.nanotechnology.hu/

Az előadássorozat anyagainak egy része még nem-megszerkesztett változat, az angolnyelvű forrásokból átvett anyagok nagy része nincs lefordítva.

2

KÖTELEZŐ IRODALOM:

Mojzes Imre, Molnár László Milán: [Nanotechnológia](#), Műegyetemi Kiadó, 2007.

Bársony István: [Mikrogépészeti eljárásokkal a nanotechnológia felé](#), Magyar Tudomány, 48. köt. 2003/9, 1083 old.

Kónya Zoltán, B. Nagy János, Kiricsi Imre, [Szén nanocsövek előállítása és alkalmazásai](#), Magyar Tudomány, 48. köt. 2003/9. szám, 1114 old.

Bíró László Péter: [Nanovilág: a szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyig](#), Fizikai Szemle 2003 (11) 585. old.

Koós Antal Adolf: [Szén nanocsöveken alapuló szelektív gázérezkelők](#), Fizikai Szemle 2006 (7) 226. old.

Kürti Jenő: [Szén nanocsövek](#), Fizikai Szemle 2007 (3) 106. old.

Pozsgai Imre: [Atomerő-mikroszkóp a Marson](#), Fizikai Szemle 2009 (1) 3. old.

Letölthetők a *Magyar Tudomány*, illetve a *Fizikai Szemle* honlapjáról!

Az előadások sok, a kötelező irodalomból átvett anyagot tartalmaznak! ³

AJÁNLOTT IRODALOM

Magyar Tudomány 2003 (9) Nanotechnológia tematikai szám, szerk. Gyulai József.

Letölthető (!) cikkeként: www.matud.iif.hu/03/sze

Az előadásokhoz kapcsolódó cikkek:

Bársony István: [Mikrogépészeti eljárásokkal a nanotechnológia felé](#), 1083-1089 old.

Kónya Zoltán és mtsai: [Szén nanocsövek és alkalmazásaik](#), 1114-1121 old.

Bíró László Péter: [Újszerű szén nanocső architektúrák](#), 1122-1129 old.

Beke Dezső és mtsai: [Diffúzió nanoskálán](#), 1130-1137 old.

Kálmán Erika és mtsai: [Nanoszerkezetű bevonatok](#), 1154-1165 old.

Vámosi György és mtsai: [Nanotechnológia a biológiában](#), 1166-1173 old.

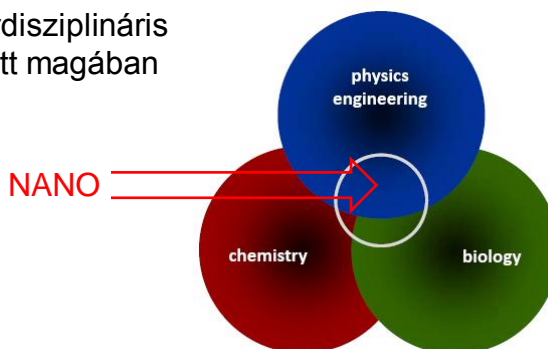
NANOTUDOMÁNY ÉS NANOTECHNOLÓGIA

Mi a nanotudomány/nanotechnológia?

Igen kisméretű, nagyjából 1 nm és 100 nm közötti méretű objektumok, az ezen a skálán végbenő jelenségek és folyamatok vizsgálata, feltárása, az objektumok és szerkezetek előállítás és alkalmazása.

Rohamosan fejlődő, interdiszplináris terület, mely többek között magában foglal

fizikát
kémiát
biológiát
technológiát
anyagtudományt
elektronikát, stb.



MIKROTECHNOLÓGIA

Az elmúlt 50 évben az elképesztő miniatürizálás az elmúlt években kifejlesztett és iparilag alkalmazott mikrotechnológiának köszönhető. A mikrotechnológia ma éli virágkorát, és az elektronika, azon belül az informatika döbbenetes fejlődését hozta magával. Létét mikroszkópnak köszönheti, és legfontosabb gyártási eszköze, mely egyben az előállított eszközök legkisebb karakterisztikus méretét meghatározza, a fotolitográfias eljárás, amikor is vékony rétegeken, első-sorban félvezetőkön, azon belül is a szilícium egykristály felületén az eszközök alapjául szolgáló struktúrákat alakítanak ki lényegében a fényképezés segítségével. Néhány négyzetmilliméter felületen tranzistorok ezreit, sőt millióit lehet ily módon felépíteni. A döntő szempont, hogy ezen összetett rendszerek tömeggyártásban készülnek, olcsók és rendkívül megbízhatóan működnek.

TECHNOLÓGIAI MÉRETSKÁLÁK

mm-es technológia: "mili"technológia

μm -es technológia: mikrotechnológia

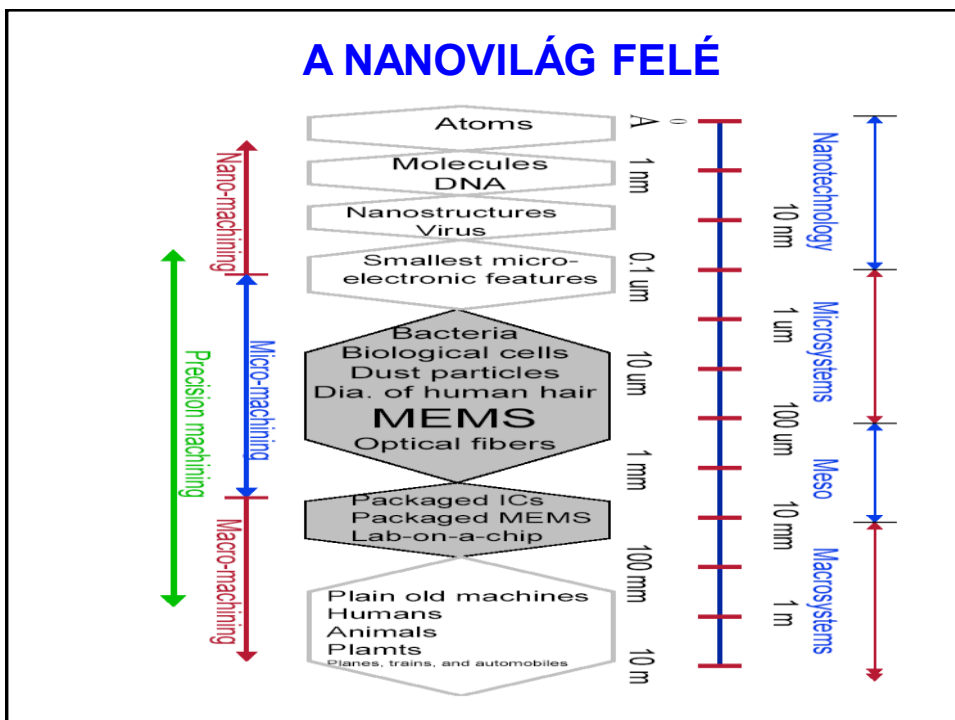
nm-es technológia: nanotechnológia

Általánosan elfogadott határ a mikro- és nanotechnológia között:

jellemző méret $< 0,1 \mu\text{m}$ (100 nm)

A félvezető (IC) technológia (tömeggyártás!) már 2003-ban átlépte ezt a "küszöböt".

7



MM-ES TECHNOLÓGIA, FINOMMECHANIKA

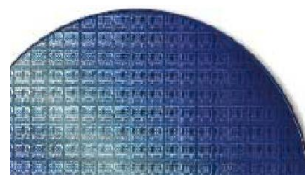
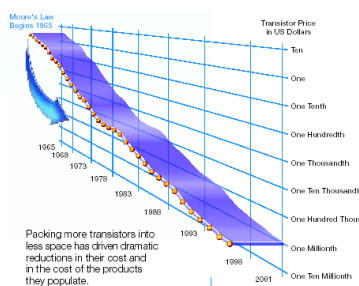
Kb. 500-600 évvel ezelőtt élte világkorát a *finommechanika*, mely a maga korában a csúcstechnológiát jelentette. Az órásmesterek, ötvösök csipeszek, és nagyítók segítségével állítottak elő, a kor csúcstechnológiáját jelentő szerkezeteket; pl.: órákat, zenélő-mozgó szerkezeteket, programvezérelt „robotokat”. Az előállított termékek érdekességei, hogy egyediek, kézi gyártmányúak, és a gyártó mester kézügyességén múlt a pontossága, megbízhatósága, mivel komoly megmunkáló gépekkel nem rendelkeztek ekkor még. A finommechanika a „*millitechnológia*” korszaka volt. A fennmaradt eszközök precizitása a mai szemmel is bámulatos megoldásokat, és megmunkálásokat hordoz.

9

MIKROTECHNOLÓGIA ÉS MIKROELEKTRONIKA

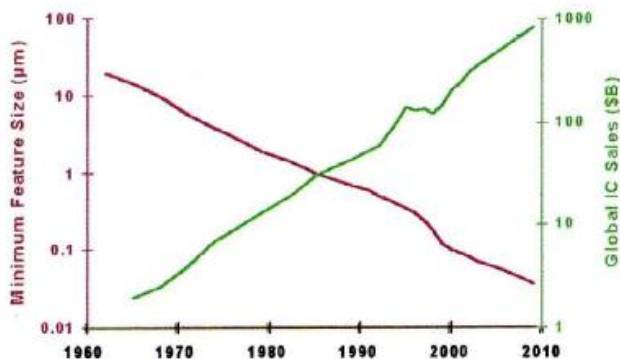
A világ technikai forradalmának kulcseleme: a **számítástechnikában** csúcsosodó **mikroelektronika**, annak a miniatürizációja húzta az összes ipart

Moore „szabály”



10

MOORE SZABÁLY



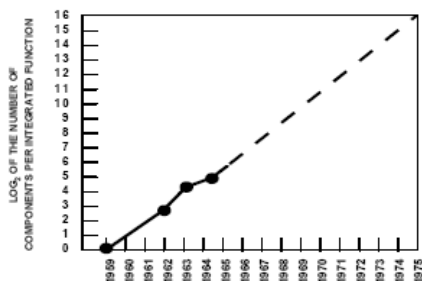
G. Moore (Fairchild/Intel) 1960-as években fogalmazta meg de még 2010-ben is működik (!):

Jellemző méretek 1,8-2 évente feleződnek

11

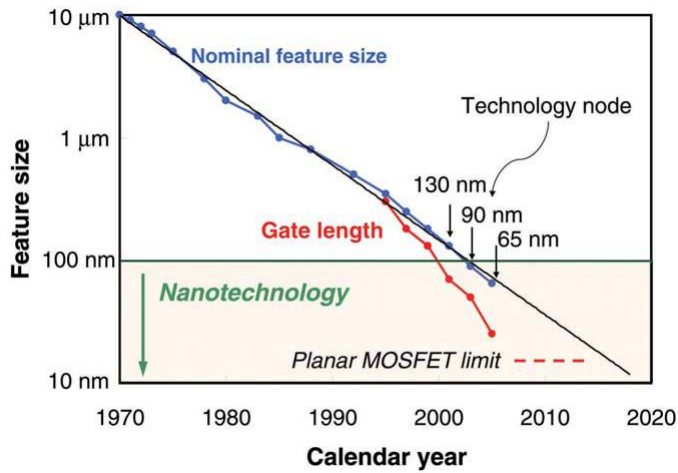
MOORE'S LAW

- In 1965, Gordon Moore noted that the number of transistors on a chip doubled every 18 to 24 months
- He made a prediction that semiconductor technology will double its effectiveness every 18 months



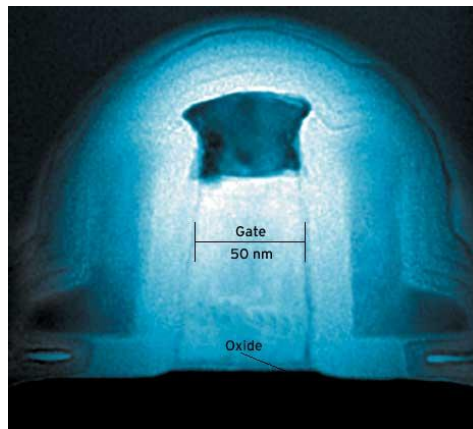
Electronics, April 19, 1965.

MOORE SZABÁLY (MOORE'S LAW)



Logic technology node and transistor gate length versus calendar year. Note mainstream Si technology is nanotechnology.

CMOS: NANOTRANZISZTOR ?



A tegnapi (tegnapelőtti ?) csúcs az INTELNÉL....

GORDON MOORE „SZABÁLY”: ”JÓSLAT” (DE BEKÖVETKEZETT...)

Év	2001	2005	2007	2010	2016
félmodul (nm)	150	100	80	55	-
	130	80	65	45	22
Fedés pontosság (nm)	50	35	25	20	15
	46	28	23	18	9
T _{oxid} egyenérték (nm)	1.6	1-1.5	1	0.8	0.5
	1.4	1.0	0.8	0.6	0.4

agresszíven érvényesül:
1999, ill. 2001 <http://public.itrs.net/> alapján

15

NANOTECHNOLÓGIA

A néhányszor tíz nanométer nagyságú fém és félvezető nanorészecskéket a kémikusok és a fizikusok már közel száz éve tanulmányozzák.

Mivel az atomok átmérője tized nanométer, a molekuláké pedig nanométer nagyságrendű, így a kémia mindig is nanokémia volt, az atom- és molekula-fizikát illetve a mezoszkopikus fizikát pedig nanofizikának is nevezhetnénk.

A közelmúltig csak nanorészecske sokaságot és azt is csak statisztikai módszerekkel lehetett kísérlet tárgyává tenni.

16

NANOTECHNOLÓGIA

Nanos görögül törpét jelent. Egy nanométer a méter egymilliárdnyi (10^{-9} -ed) része.

A néhányszor tíz nanométer nagyságú fém és félvezető nanorészecskéket a kémikusok és a fizikusok már közel száz éve tanulmányozzák. Mivel az atomok átmérője tized nanométer, a molekuláké pedig nanométer nagyságrendű, így a kémia mindig is nanokémia volt, az atom- és molekula-fizikát illetve a mezoszkopikus fizikát pedig nanofizikának is nevezhetnénk.

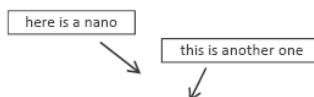
A közelmúltig csak nanorészecske sokaságot és azt is csak statisztikai módszerekkel lehetett kísérlet tárgyává tenni.

17

NANO...

Nanos görögül törpét jelent.
Egy nanométer a méter egymilliárdnyi (10^{-9} -ed) része.

1 nanometer = 10^{-3} micron = 10^{-9} m (1 nano = 10^{-9})



nanos *Greek* – the dwarf

nano – objects

- individuals & novel properties
- new laws of physics
- new schemes of interaction

18

NANOTECHNOLÓGIA ÉS TUDOMÁNY

A "nanotechnológia", helyesebben a "nanotudomány" területén ma még a legfejlettebb társadalmakban is elsősorban az alapeszközök előállítása, a megfelelő szimulációs, manipulációs, preparációs és analitikai/mérési módszerek kutatása és fejlesztése van napirenden. Az atomi pontosságú gyártás megvalósításához ugyanis szükség van molekulaszintű manipulációra és szintézisre, valamint a mikro- és milliméter skálán működő technológiák összekapcsolására, hogy teljes egészében lefedhető legyen a nm-től mm-ig terjedő mérettartomány. A majdan előállított nanoszerkezetek kapcsolatát a makrovilággal ugyanis többszörös áttételen keresztül, mikro- és milliméter méretű eszközök közbeiktatásával lehet csupán elképzelni, ezért a problémát összetett módon, rendszerszinten kell kezelni.

19

NANOTECHNOLÓGIA ÉS TUDOMÁNY

A termékek miniatürizálásának trendje tehát (legalábbis kezdetben) korántsem azt jelenti, hogy valamennyi funkciót, amit eddig mikroméretben valósítottunk meg, ezután nanoskálán próbáljuk megvalósítani és ezáltal gyorsabbá, olcsóbbá tenni. Ellenkezőleg, az önszerveződés, a masszív párhuzamos rendszerek belépésével a bottom-up szintézis a "tradicionális" top-down technológiával, azaz destruktív módszerekkel gyártott eszközökben teremt lehetőséget új funkciók beillesztésére. A nanoméretű gyártástechnológiák tehát elsősorban a testre szabási követelmények kielégítésének eszközei lesznek az információ-technológiában, az orvostudományban és a gyógyászatban, a repülés- és űrkutatás, a gépkocsiipar, a környezet- és energiaipar területén használt MEMS eszközökben.

20

NANOMÉRETES ESZKÖZÖK NANOTECHNOLÓGIA

Utazás a törpék birodalmába (nanos = törpe)

nanométer = 10^{-9} m = 10 Angström

Minden olyan eszköz, amelynek jellemző hossza a nm tartományába esik.

Egy milliméteren ezer darab egy mikron vastagságú szál helyezhető el. Egy átlagos hajszálat körülbelül 50 darab, egymikronos átmérőjű részre lehetne hasítani.

A betegségeink jelentős hányadát előidéző baktériumok jellemző méretei az 1-10 mikronos tartományba esnek. Ezt a méretet azért érdemes megjegyezni, mert a baktériumok többé-kevésbé "szabadon" közlekednek az élőlények testében. Ez az állítás fokozottan igaz a mikronnál kisebb objektumokra, az úgynevezett nanoobjektumokra. Egy nanométer ezerszer kisebb, mint a mikron, azaz egy baktérium 1000-10 000 egy nanométeres szeletre szeletelhető.

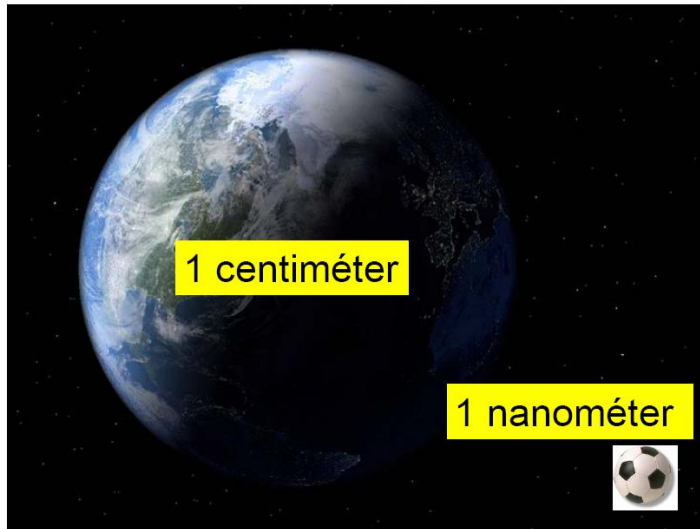
NANOMÉRETES ESZKÖZÖK NANOTECHNOLÓGIA

Nanotechnology - összefoglalóan a nm-es eszközökkel foglalkozó tudományágak angol elnevezése
(benne van az elmélet, előállítás, alkalmazás is).

Nanotechnológia - magyar terminológia, nm-es eszköz előállítási technológiája

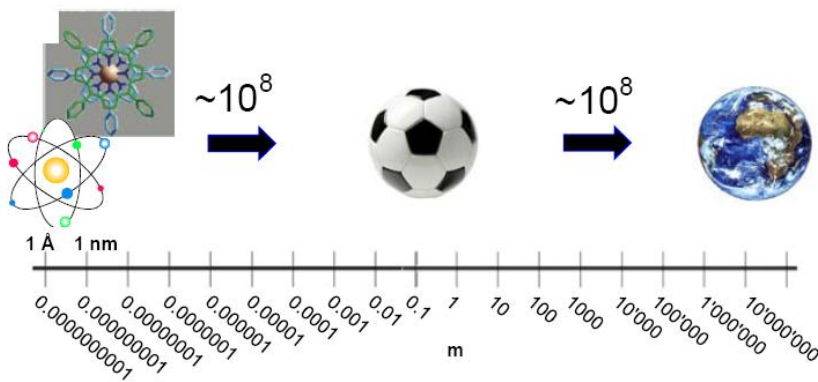
Nanotechnológia: olyan eljárások összessége, amelyek segítségével nanométeres (10^{-9} m) méretű objektumokat lehet létrehozni, végtermékeik jellemző méretei az 1-100 nm tartományban vannak.

MÉRETARÁNYOK...



23

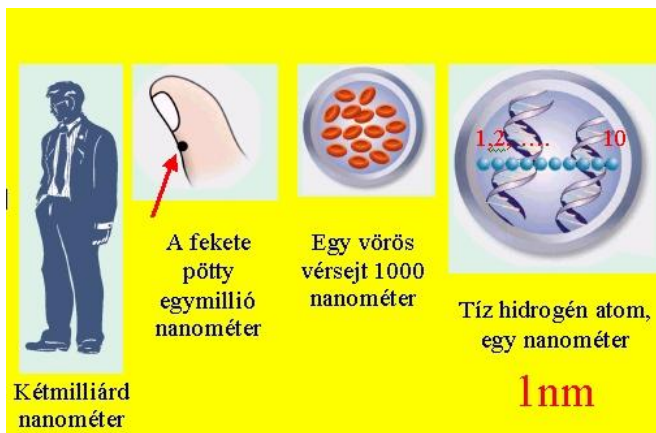
MÉRETARÁNYOK...



Mégegyszer a méretskála....

24

MÉRETARÁNYOK: AZ EMBERTŐL A NANOMÉTERIG

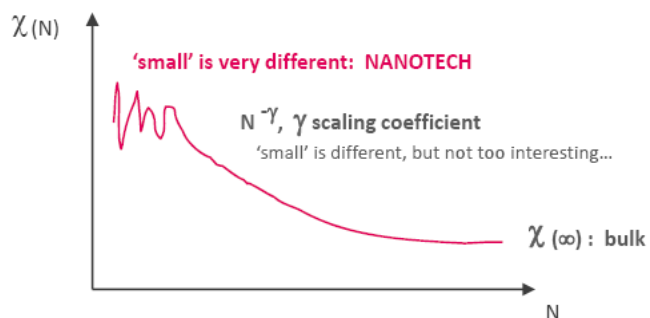


25

NANOTECHNOLÓGIA: DEFINÍCIÓ

Nanotechnology is engineering of matter on the sub-100 nm scale, with the result of new components with novel properties.

Új tulajdonság:



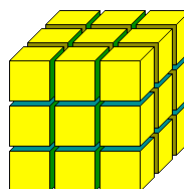
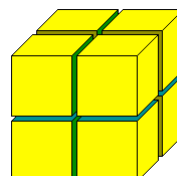
Nanoméretű objektumok tulajdonságai mások mint ugyanazon anyag nagyobb méretű részecskéié.

26

AZ ARANY MINDIG "ARANY"?

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"?

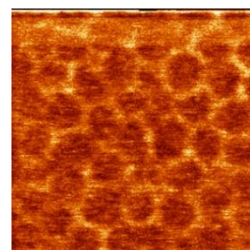


27

NANOARANY

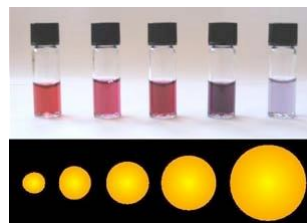
Az arany nm-es méretre darabolva már nem aranszínű, hanem VÖRÖS!

Sőt a méretettől függően vörös, kék, sárga, és más színűnek is látszanak.



12 nm-es aranyrészecskék vörösnek látszanak
Más méreteknél a színük is más

Oka: különböző vastagságú anyag-részecskék másképp nyelik el, illetve verik vissza a fényt.



NANOTECHNOLÓGIA KEZDETEI

Az 1980-as és 1990-es években a nanokémia és nanofizika megkezdte az egyedi nanorészecskék és egyedi molekulák világának birtokba vételét, mivel újfajta mikroszkópok és eljárások egész sora jelent meg. A pásztázó alagútmikroszkópok ([Scanning Tunneling Microscope -STM](#)) és az atomerő mikroszkópok ([Atomic Force Microscope -AFM](#)) már nem csak bepillantást engednek ebbe a világba, hanem kialakulóban vannak eljárások az anyag nanométeres finomságú megmunkálására is. Évről évre új mérési eljárások és műszerek, valamint új megmunkálógépek születnek, új nanotechnológiai laboratóriumok épülnek.

29

A NANOTECHNOLÓGIA SZÜLETÉSE

A nanotechnológia születése kapcsán szokás [Richard P. Feynman](#) híres, 1959-es előadását idézni: [There's Plenty of Room at the Bottom, An Invitation to Enter a New Field of Physics](#) (Bőven van hely lefelé. Kedvcsináló a fizika új területének feltárására) . Kivételes előrelátásra, vízióra vall, hogy még az integrált áramkörök megjelenése előtt, immár bő negyven éve megnevezte a méretek csökkentésének, azaz az integrációnak fő hajtóerejét: "Az információ nem terjedhet a fénysebességnél gyorsabban, így ahhoz, hogy számítógépeink egyre gyorsabban és precízebben működhessenek, egyre kisebb méretűekké kell válniuk.

30

A NANOTECHNOLÓGIA SZÜLETÉSE

Megállapította, hogy atomonkénti építkezéssel, elképzelt minta szerinti elrendezésben (a kémiai stabilitással összhangban) jobban befolyásolhatók az anyagtulajdonságok. A tömeggyártás abszolút méretazonossággal (értsd "nanotechnológia!") azonban csak százatomos méretben reális. Rámutatott, hogy a csökkenő méretekkel nem minden paraméter változik egyenes arányban, ezért merőben új problémák is adódnak (például a van der Waals-erők miatti összetapadás). Atomi szintű építkezéssel viszont a kémiai és végül a biológiai szintézis is megoldható. Ha a biológiai jelenségek analógiájára ismétlődő módon használjuk a kémiai erőket (önszerveződés), merőben új eredmények (értsd "genetika-analóg") érhetők el.

31

A NANOTECHNOLÓGIA SZÜLETÉSE

Eszerint a nanoméreték tartományában, az anyagszintézisen alapuló bottom-up építkezés esetében, ma még aligha beszélhetünk a szó szoros értelmében vett ipari szintű reprodukcióról, azaz "technológiáról". Bár a mikroelektronika kritikus méretei ma már a nanotartományba (<100 nm) esnek, az IC-technológia a réteges építkezést keveri a top-down, azaz lebontó, destruktív építkezés elvével.

32

Igen fontos lépés volt a nanométeres vagy annál kisebb tárgyakat az ember számára láthatóvá varázsoló eszközök megjelenése. Egyrészt a már klasszikusnak számító elektronmikroszkópiát (1933-ban fedezte fel E. Ruska) sikerült arra a szintre tökéletesíteni, ahol képes rutinszerűen feloldani a néhány tízednanométeres részleteket. Másrészt svájci fizikusok 1981-ben a fénymikroszkóptól (mikronos felbontás) és az elektronmikroszkóptól teljesen eltérő elven működő, új mikroszkópcsalád első tagját fejlesztették ki: az alagútmikroszkópot. Ez képes az atomi méretű részletek (a nanométer tizedrésze) felbontására is. Segítségével először "pillantott meg" az ember atomokat, és megvizsgálhatta egy szabályos atomi elrendeződésben (kristályban) egyetlen atom hiánya által előidézett változásokat! Binning és Rohrer 1986-ban Nobel-díjat kaptak a felfedezésükért.

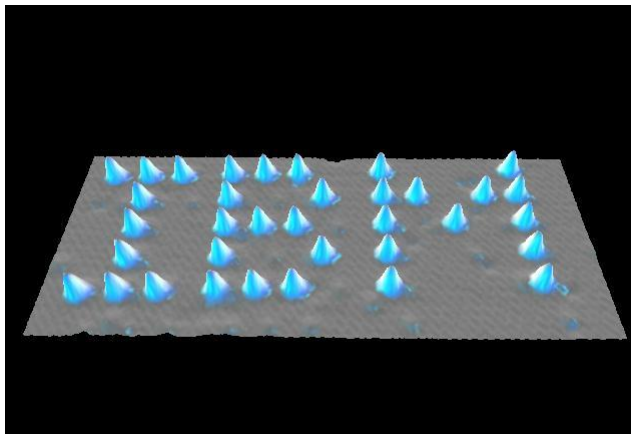
33

A NANOTECHNOLÓGIA

- 1959 - [Richard P. Feynman](#) Nobel-díjas tudós: „egy napon a tudomány segítségével képesek leszünk egy enciklopédia tartalmát egyetlen tűhegyre felírni”
- 1981.09. - első tudományos közlemény a témában a *Proceedings of the National Academy of Sciences* című folyóiratban
- 1989 - az IBM kutatói (IBM Almaden Research Laboratory, San Jose, California), pásztázó alagút mikroszkóp segítségével 35 xenon (Xe) atomot helyeztek el egy -270 °C -ra hűtött felületre úgy, hogy az IBM betűit formálták meg
- ma különleges anyagokkal (mint pl. a fullerén - C_{60}) és speciális eljárásokkal parányi motorokat, eszközöket és a jóslathoz kapcsolódóan miniatűr, 10^{-9} m nagyságrendű betűket is képesek vagyunk készíteni



STM



Az STM mint nano „szerszám”

35

SCANNING TUNNELING MICROSCOPY

A pásztázó alagút(áram)mikroszkóp (Scanning Tunneling Microscopy, STM) az a nyolcvanas években [Gerd Binnig](#) és [Heinrich Rohrer](#) (IBM, Zürich) által kifejlesztett forradalmian új vizsgáló eljárás, amely lehetővé teszi, hogy szilárd felületekről addig soha nem látott felbontással készítsünk képeket.

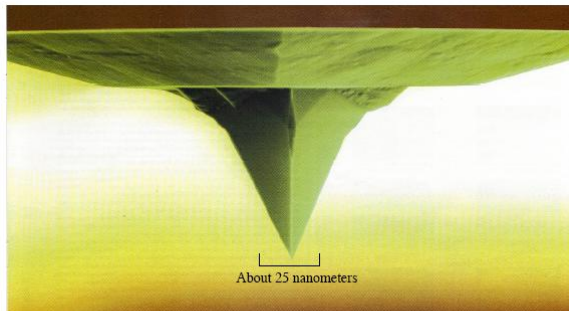
Az STM működésének alapja a kvantummechanikából jól ismert alagútáram, amely akkor folyik, ha egy hegyes tű nagyjából 1-2 nm távolságra megközelít egy elektromosan vezető felületet.

A hegyes tűt egy piezoelektromos rúd végén helyezkedik el, így parányi elmozdulása elektronikusan vezérelhető. Mialatt végigpásztázza a felületet, az STM elektronikája mindig úgy mozditja el, hogy az alagútáram, és így tulajdonképpen a felület és a tű távolsága állandó maradjon. A felület pontos lekötetése rögzíthető és ábrázolható úgy, mint a felület domborzati képe.

36

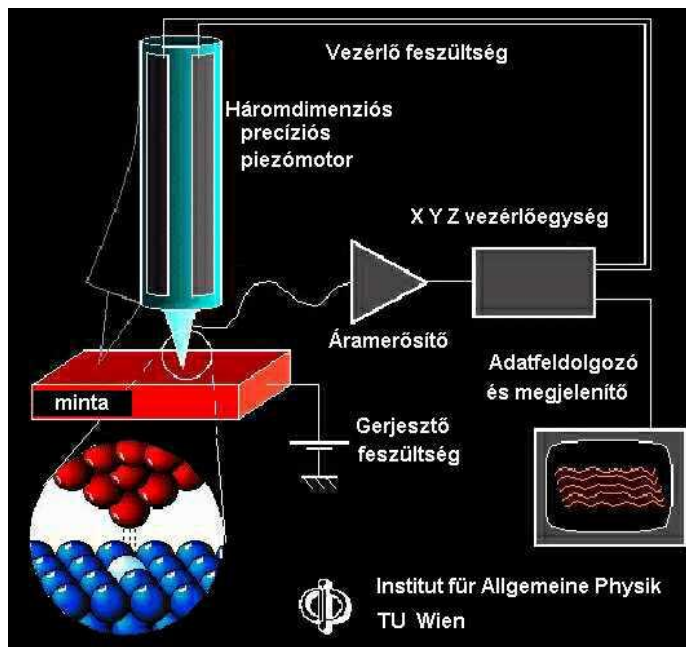
Scanning probe microscopes, developed in the 1980s, give us a new way to “see” at the nanoscale

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

37



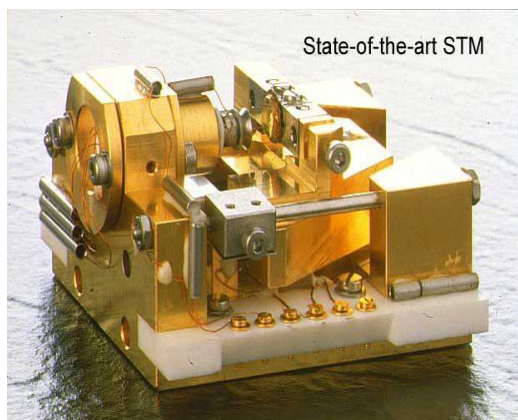
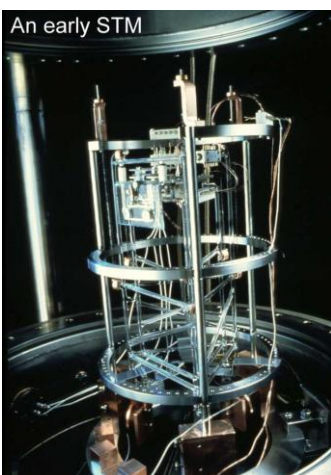
38

STM

A hegyes tűt egy piezoelektromos rúd végére szereljük, így parányi elmozdulása elektronikusan vezérelhető. Mialatt végigpásztázza a felületet, az STM elektronikája mindig úgy mozdítja el, hogy az alagútáram, és így tulajdonképpen a felület és a tű távolsága állandó maradjon.

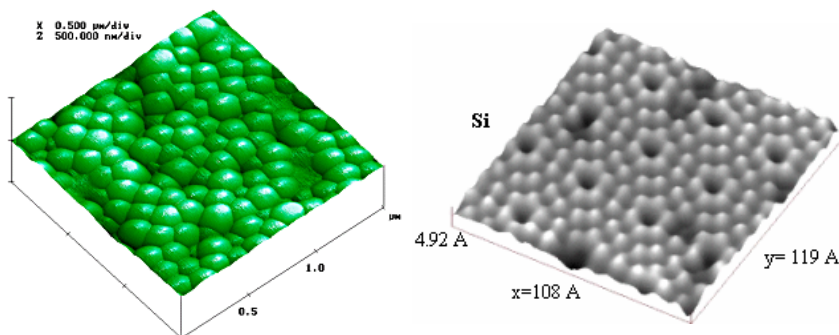
39

SCANNING TUNNELING MICROSCOPE



40

STM FELVÉTELEK: PÉLDÁK



Pásztázó alagút mikroszkóppal készített felvételek során a felület pontos lekövetése rögzíthető és ábrázolható úgy, mint a felület domborzati képe az egyes atomok felülete egymástól megkülönböztethető, és láthatóvá tehető.

41

MIÉRT MÁS A NANOMÉRETEK VILÁGA?

- A fizikus szemével: azért mert az egy nano-objektumot alkotó atomok döntő többsége felületi atomnak tekinthető

⇒ olyan mint „csomagolópapír az ajándékon”, más mint maga az ajándék



ÚJ tulajdonságok

MÉRET meghatározta viselkedés

KVANTUMOS hatások

ATOMOKBÓL

összeépíthetők „kifaragás” helyett

42

MŰKÖDÉSI ELVEK MIKRO- ÉS NANOSKÁLÁN

Micro- and Nano-scale physics may behave differently in macro-scale world, e.g. Sticking effect, surface tension, quantum tunneling effect

Surface effects are playing more important roles in the operational physics of micro- and nano-structures and devices

Felületi és tömbben lévő atomok aránya 1 cm^3 , $1 \mu\text{m}^3$ és 1 nm^3 kocka esetén (atomok távolsága $\sim 0,25 \text{ nm}$):

$$1 \text{ cm}^3 : (6 \times (4 \times 10^7)^2) / (4 \times 10^7)^3 = 1,5 \times 10^{-7}$$

$$1 \mu\text{m}^3 : \sim (6 \times 4000^2) / (4000)^3 = 0,0015$$

$$1 \text{ nm}^3 : (64 - 8) / 64 = 0,875$$

SKÁLA ANALÍZIS

Most physical quantities (force, mass, volume, etc.) scale differently with dimension L

Example: weight-lifting of human being. Assume the muscle stress is the same for different human body size,

$$\text{Body weight} \sim L^3$$

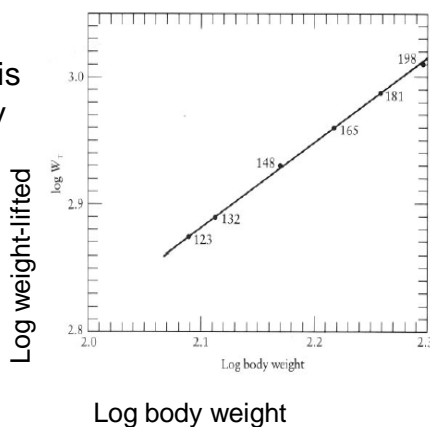
$$\text{Weight-lifted}$$

$$\sim (\text{muscle stress}) \times (\text{area})$$

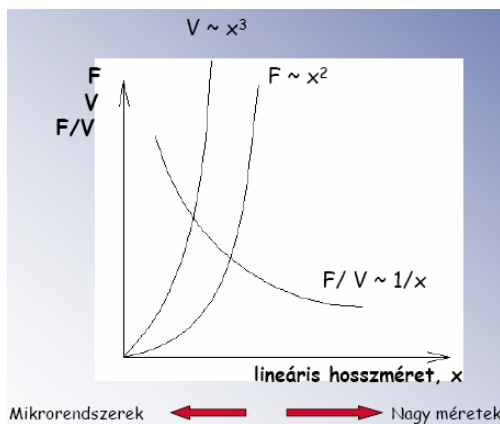
$$\sim \text{constant} \times L^2$$

$$\sim (\text{Body weight})^{2/3}$$

**World weight-lifting record
Vs. Body weight**



A KIS MÉRETEK HATÁSA



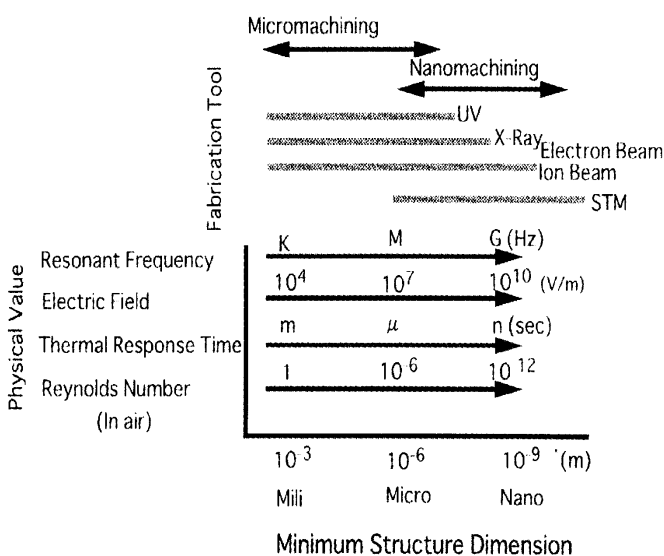
Felület [m^2] $F \sim x^2$
 Térfogat [m^3] $V \sim x^3$
 Súly [N] $G \sim V \sim x^3$

$F/V \sim 1/x$

x - hossz méret

45

A MÉRETCSÖKKENTÉS HATÁSAI



A mikro-mechanikai eszközökben az arányos méretcsökkentés révén várható előnyök:

a rezonancia frekvencia,

az elérhető elektromos tér,

a termikus válaszidő,

a folyadék-mechanika (Reynolds szám levegőben) vonatkozásában.

46

A MÉRETEK HATÁSA A SZÁRNYFREKVECIÁRA A TERMÉSZETBEN

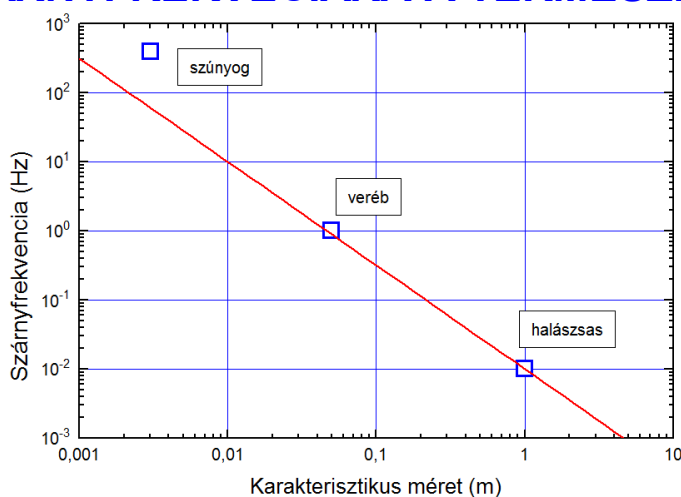


Halászsas: 0,01 Hz veréb: 1 Hz szúnyog: 400 Hz

A kisebb méretű repülő állatok szárnyfrekvenciája nagyobb ,
mint a nagyobb termetűeké

47

A MÉRETEK HATÁSA A SZÁRNYFREKVECIÁRA A TERMÉSZETBEN



Fizikai modell:

$$f \sim m^{-1/2} \sim L^{-3/2}$$

Az adatokra illeszthető egyenes meredeksége kb. -1,5 !

48

A KIS MÉRETEK KÖVETKEZMÉNYEI

1. A lineáris méretek csökkenésével a térfogat, és ezzel együtt a tömeg/súly is a harmadik hatvánnyal csökken. Emiatt pl. a finommechanikában, vagy akár a mikromechanikában az objektum vagy eszköz súlyából eredő erőhatásokra nem kell méretezni.

2. A lineáris méretek csökkentésével a felület négyzetesen, azaz a térfogathoz képest egy hatványkitevővel kisebb mértékben csökken. Tehát a kisebb objektum, eszköz vagy szerkezet viszonylag nagy felületű lesz. Ennek egyik következménye, hogy egy kisebb szerkezet relatíve nagyobb teljesítményekre képes, mivel a relatíve nagyobb felület miatt jobbak a hűtési viszonyok. A másik, még fontosabb következmény, hogy megnő, illetve dominánssá válnak a felületi hatások.

49

A KIS MÉRETEK KÖVETKEZMÉNYEI

3. A lineáris méretek csökkenésével a rendszer sajátfrekvenciája növekszik. Ez azt jelenti, hogy kisebb rendszer gyorsabb működésre képes.

4. A lineáris méretek csökkenésével a kapacitások (elektromos-, hő-) is csökkennek. Ennek következménye szintén a gyorsabb működés.

5. A lineáris méretek csökkenésével eddig figyelmen kívül hagyott fizikai törvények kerülnek előtérbe. Pl. felületi feszültség, vagy kvantummechanikai (méret-) hatások.

50

NANOSZERKEZETEK

Nanostructures

**What kind of nanostructures
can we make?**

**What kind of nanostructures
exist in nature?**

Milyen nanoszerkezeteket állíthatók elő ?

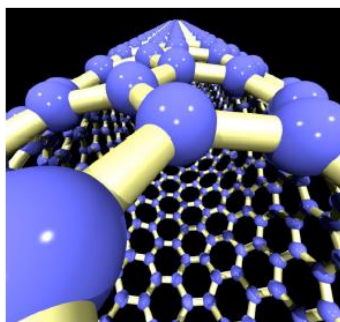
Milyen nanoszerkezetek találhatóak a természetben ?

51

SZÉN NANOCSSÖVEK

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



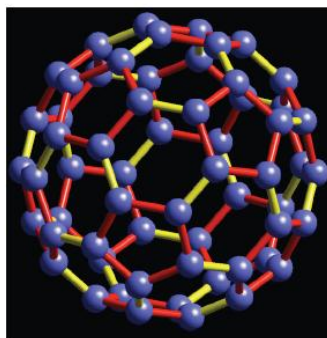
Model of a carbon nanotube

52

FULLERÉNEK (C₆₀)

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)



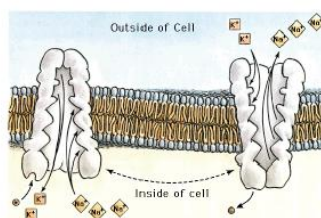
Model of Buckminsterfullerene

53

BIO-"NANOGÉPEK" A TERMÉSZETBEN

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



http://faculty.sba.usf.edu/whb/ana2002/lec10/04/lec10_04.htm

54

NANOSZERKEZETEK LÉTREHOZÁSA

Building Nanostructures

How do you build things that are so small?

55

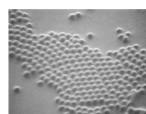
ELŐÁLLÍTÁSI MÓDSZEREK

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

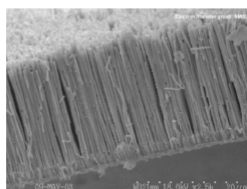


56

PÉLDA: ÖNSZERVEZŐDÉS HATÁSA

Example: Self Assembly By Crystal Growth

- **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



Growing a forest of nanotubes!

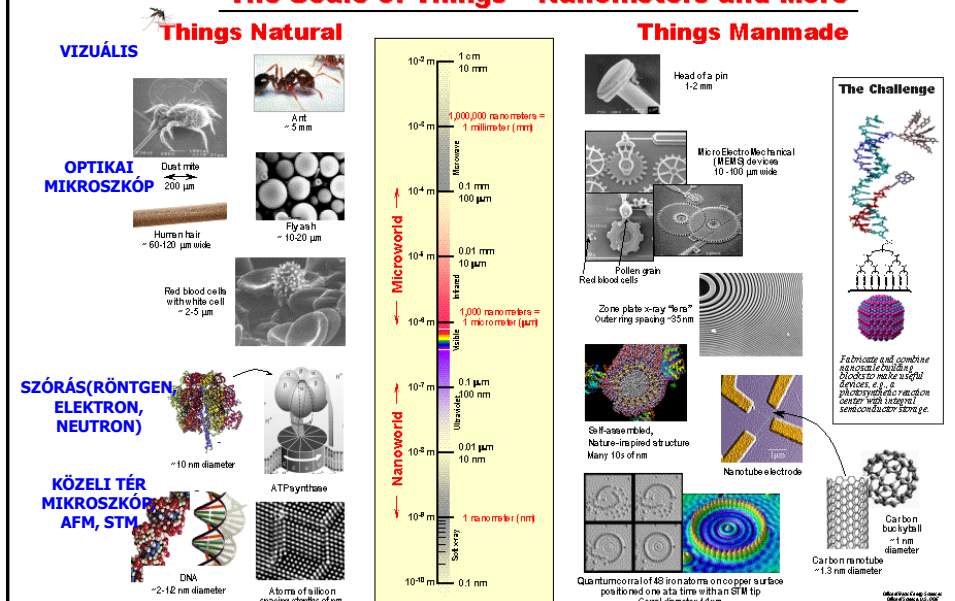
- **Because of the large number of structures you can create quickly, self-assembly is the most important fabrication technique**



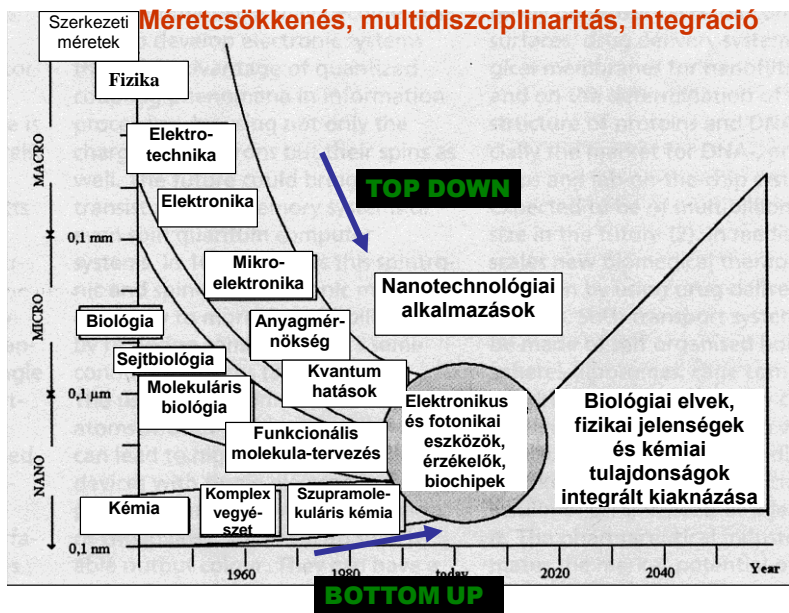
57

A NANOVILÁG FELÉ

The Scale of Things – Nanometers and More



ÚT A NANONTECHNOLÓGIÁHOZ



VÉGE