

# Nanoelektronika, nanotechnológia - Bevezetés

Dr. Bonyár Attila, egyetemi docens

[bonyar@ett.bme.hu](mailto:bonyar@ett.bme.hu)

Budapest, 2023.03.08.

# Bemutakozás



- **2009: okleveles villamosmérnök** (ötéves képzés),
- **2011: egészségügyi mérnök (MSc)**,
- **2014: PhD** (Fémes nanoszerkezetek vizsgálata atomierő mikroszkópiával (AFM)),
- **2021: Habilitáció** (Plazmonikus elvű bioérzékelők kutatás- fejlesztése),
- **Oktatott tárgyak: Nanotudomány (MSc)**, Alkalmazott nanotudomány (PhD), **Bio- és nanoszenzorika (MSc)**, Nanoelektronika, nanotechnológia (MSc), Alkalmazott szenzorika (MSc).

- **Kutatási területek:** bioszenzorok, optikai (plazmonika) szenzorok, nanometrológia (AFM).
- **Fontosabb pozíciók:** villamosmérnöki szakbizottság (2016-), egészségügyimérnöki szakbizottság (2018-), MTA-EETT (2017-), IEEE Nanotechnology Council (NTC) TC-11 chair (2021-).

# Áttekintés

1. Bevezetés – „nano” definíciók
2. Nanoorientáció
3. Nanoanyagok csoportosítása

# 1. Bevezetés

## Mi az a nano?

Nanosz (νανος): görögül *törpe*

1960. óta SI előtag:  $10^{-9}$

Nano előtagú mértékegységek:

- Nanométer  
*Emberi hajszál átmérője kb. 50000 nm*  
*10 atom átmérője összesen kb. 1 nm*
- Nanoszekundum  
*A fény 1 ns alatt 30 cm-t tesz meg*

# 1. Bevezetés



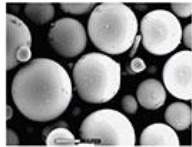
## Things Natural



Dust mite  
~200  $\mu\text{m}$



Ant  
~5 mm

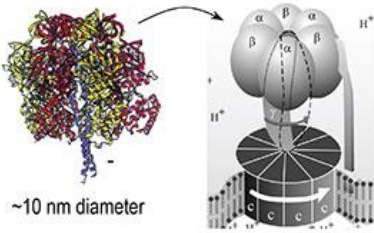
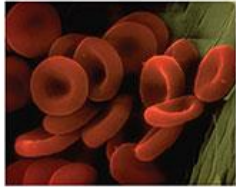


Fly ash  
~10-20  $\mu\text{m}$



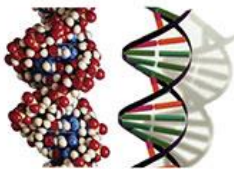
Human hair  
~60-120  $\mu\text{m}$  wide

Red blood cells  
(~7-8  $\mu\text{m}$ )

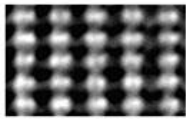


~10 nm diameter

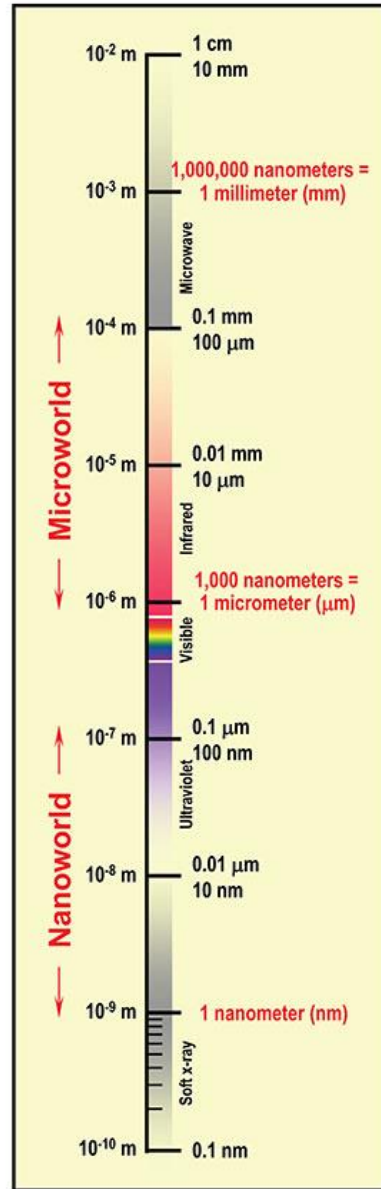
ATP synthase



DNA  
~2-1/2 nm diameter



Atoms of silicon  
spacing 0.078 nm

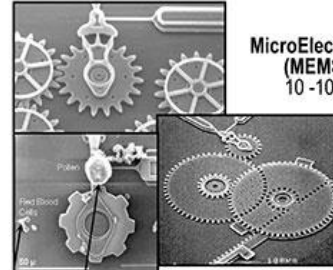


<https://ora.u.org/ihos/tech-topics/nanotechnology-scale.html>

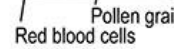
## Things Manmade



Head of a pin  
1-2 mm

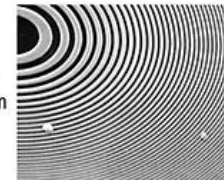


MicroElectroMechanical (MEMS) devices  
10 -100  $\mu\text{m}$  wide

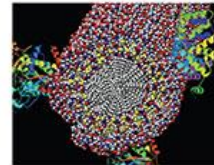


Pollen grain

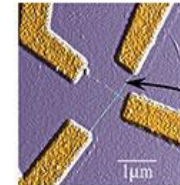
Red blood cells



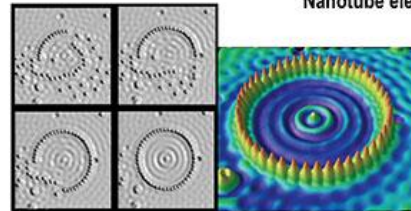
Zone plate x-ray "lens"  
Outer ring spacing ~35 nm



Self-assembled, Nature-inspired structure  
Many 10s of nm



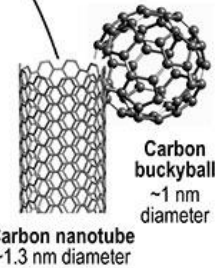
Nanotube electrode



Quantum corral of 48 iron atoms on copper surface  
positioned one at a time with an STM tip  
Corral diameter 14 nm

### The Challenge

*Fabricate and combine nanoscale building blocks to make useful devices, e.g., a photosynthetic reaction center with integral semiconductor storage.*



Carbon nanotube  
~1.3 nm diameter

# 1. Bevezetés

## Történet

**Vízió:** 1959. december 29., California Institute of Technology,  
**Richard P. Feynman** – "There's Plenty of Room at the Bottom" c. előadása

- az anyag manipulálásának és irányításának nehézsége az atomi méretskálához közeli tartományokon,
- ismert fizikai törvényekből extrapolált,
- egy olyan technológiát vizionalizált, amely a természethez hasonlóan atomonként vagy molekulánként épít fel nanoobjektumokat.

**Realizáció:** Az 1980-as évektől kezdve folyamatosan felfedezések és találmányok támasztották alá a „vízió” lehetőségét.

**Elismerés:** 2000. január, California Institute of Technology,  
**W. J. Clinton** (elnök) – előadás a „nanotechnológia” lehetőségeiről és fontosságáról. NNI: National Nanotechnology Initiative – kiemelt fontosságú és kiemelten támogatott tudományos kutatási terület 2001-től.

# 1. Bevezetés

## Történet

### Meghatározó eredmények a 80-as évektől:

- 1981 – pásztázó alagútmikroszkóp (STM) felfedezése (Binnig, Rohrer),
- 1985 – C60 fullerén felfedezése (Smalley, Curl és Kroto),
- 1986 – atomerő mikroszkóp (AFM) felfedezése (Binnig, Rohrer),
- 1987 – az elektromos vezetés kvantumjellegének első megfigyelése,
- 1987 – az első egyelektron-tranzisztor létrehozása (Fulton, Dolan),
- 1991 – többfalú szén nanocső (MWCNT) felfedezése (Iijima),
- 1993 – egyfalú szén nanocső (SWCNT) felfedezése (Iijima, Bethune).



# 1. Bevezetés

## Terminológia és definíciók

**Nanotudomány** (nanoscience, nanoscale science): "...is the study of phenomena and manipulation of materials at atomic, molecular, and macromolecular scales, where properties differ significantly from those at a larger scale." (Royal Society definíció alapján).

**Nanotechnológia:** "...the ability to individually address, control, and modify structures, materials and devices with nanometre precision, and the synthesis of such structures into systems of micro- and macroscopic dimensions..." (Nanotechnology, IOP Publishing)

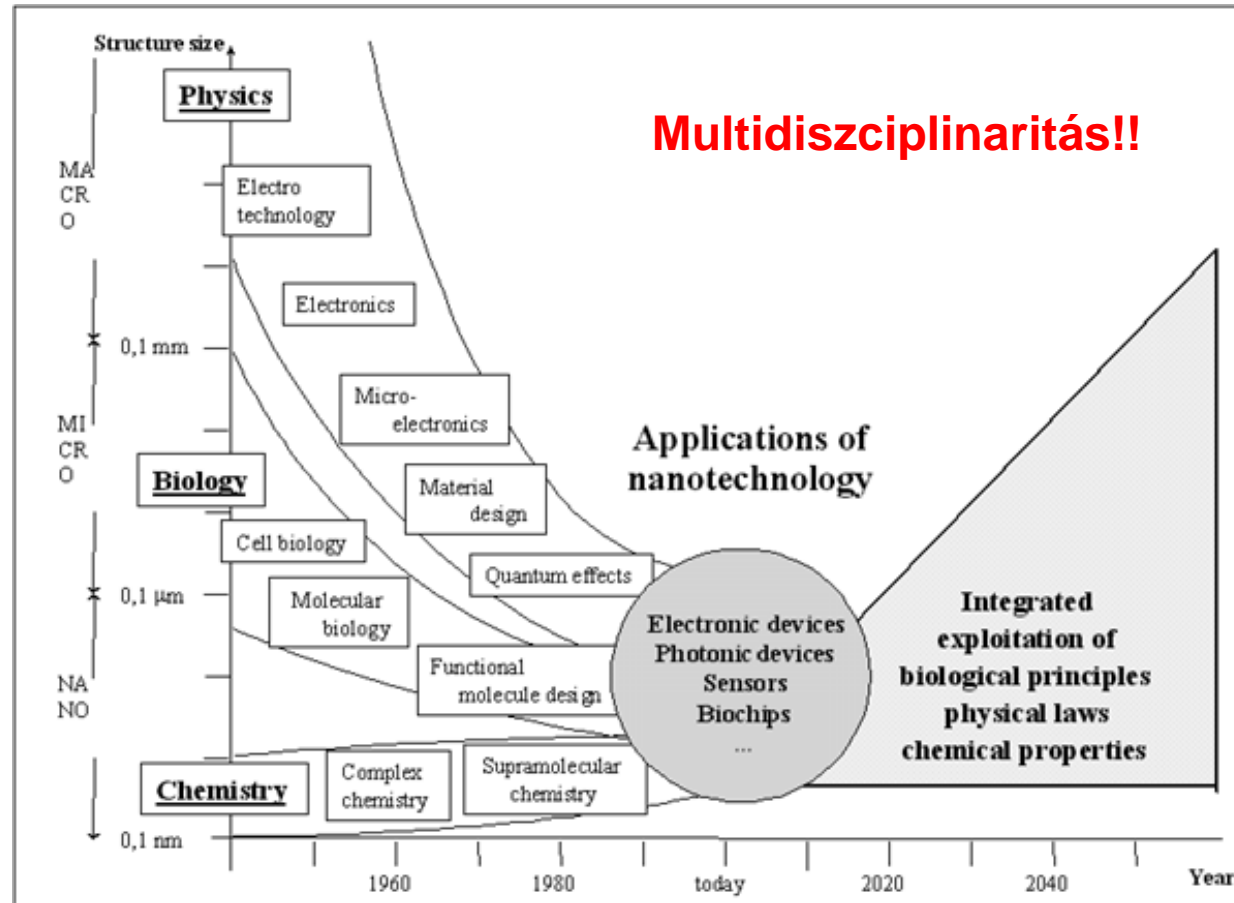
A tradicionális tudományos és technológiai diszciplínák (pl. fizika, biológia, kémia) egybefonódnak a nanotudományban és nanotechnológiában.

„A nanotechnológiai játék neve a multidiszciplinaritás”. (Chilcott, 2001).



# 1. Bevezetés

Fizika + Biológia + Kémia = Nanotudomány

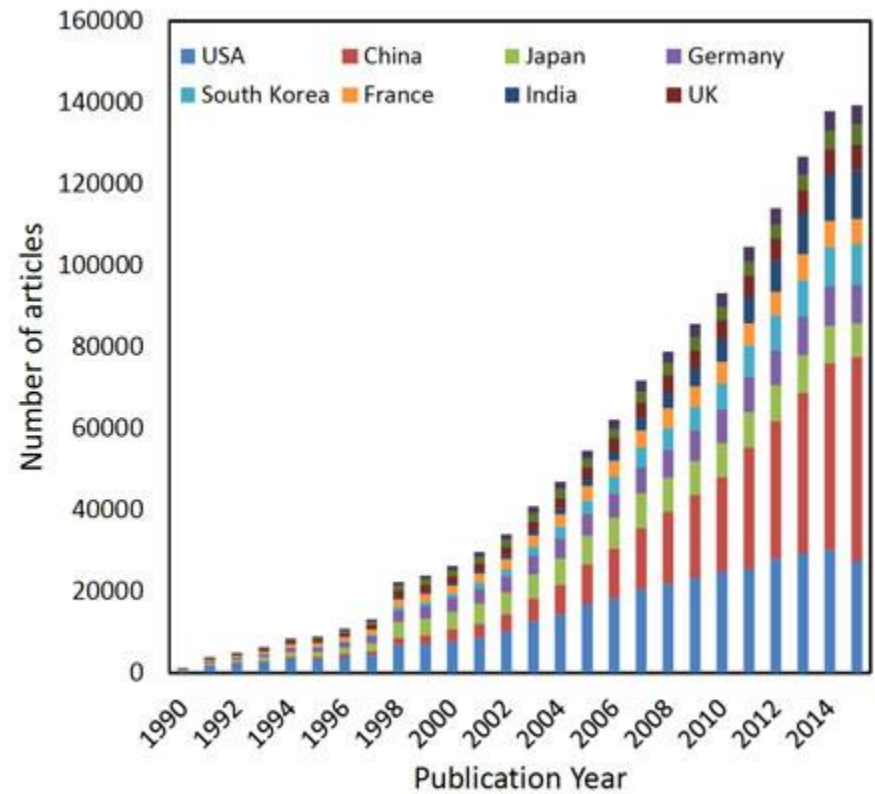


A természettudományok határai elmosódnak a nanométeres mérettartományban

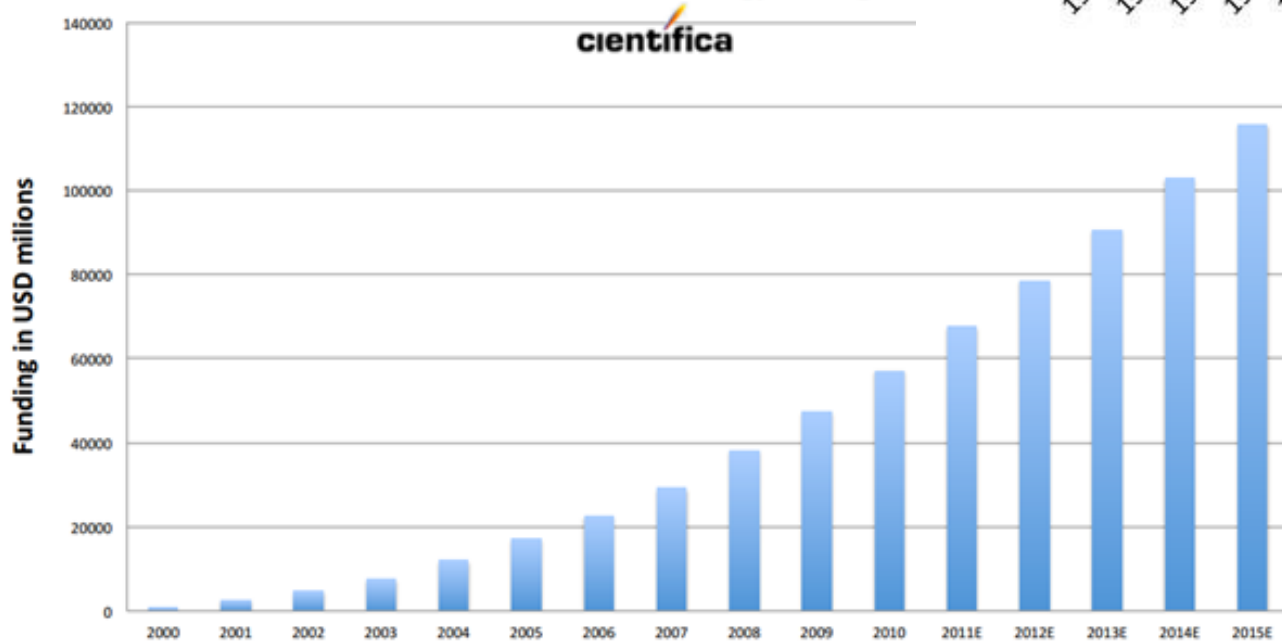
# 1. Bevezetés

## A nanoszféra növekedése:

- sokáig közel exponenciális növekedés minden téren
- szigmoid szerű tetőzést vártak, de ez nem teljesül minden téren (pl. funding)



Total Global Nanotechnology Funding



[https://www.nanowerk.com/nanotechnology/ten\\_things\\_you\\_should\\_know\\_6.php](https://www.nanowerk.com/nanotechnology/ten_things_you_should_know_6.php)

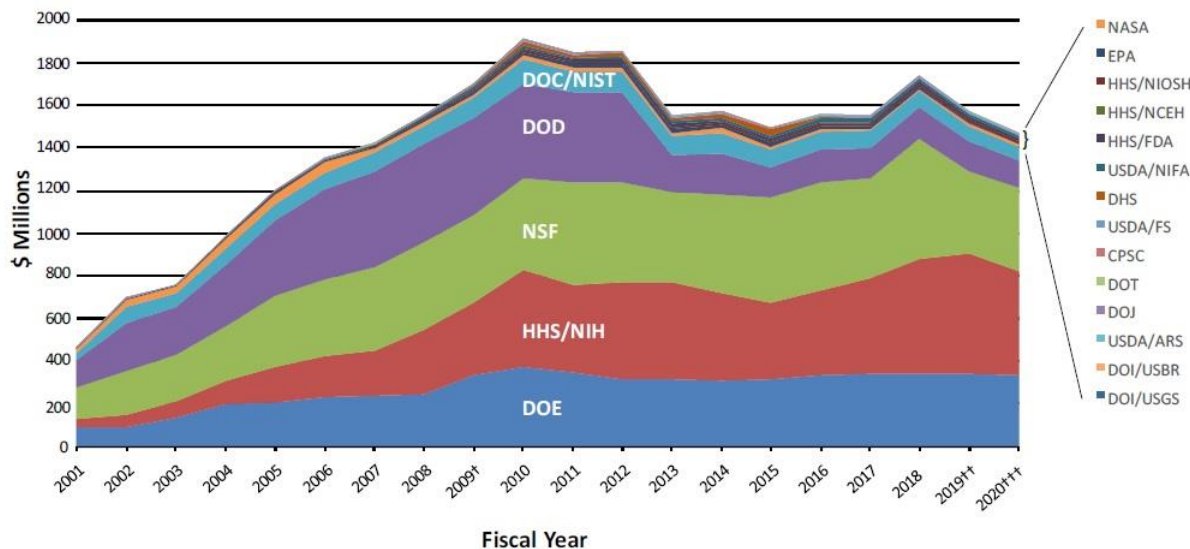
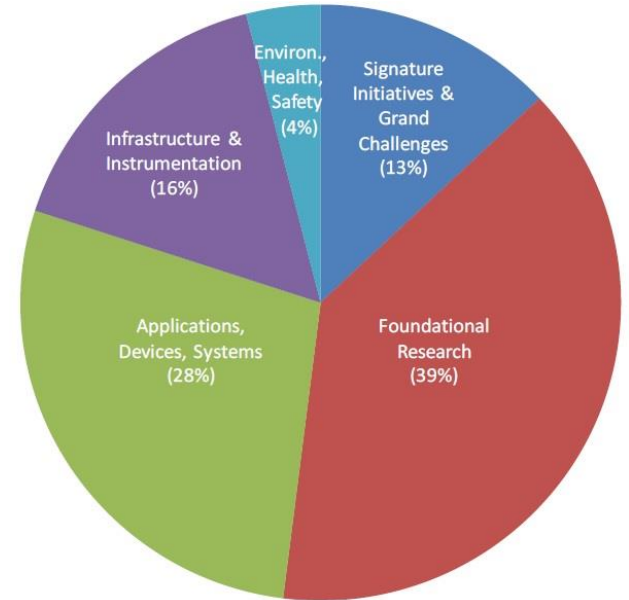
<http://nanoscience.alliedacademies.com/2018>

# 1. Bevezetés

## Az NNI budget felosztása szervezetenként az USA-ban

### A főbb szervezeti egységek:

- Consumer Product Safety Commission (CPSC)<sup>1</sup>
- Department of Commerce (DOC)
  - National Institute of Standards and Technology (NIST)
- Department of Defense (DOD)
- Department of Energy (DOE)
- Department of Health and Human Services (DHHS)
  - Food and Drug Administration (FDA)
  - National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)
  - National Institutes of Health (NIH)
- Department of Homeland Security (DHS)
- Department of Transportation (DOT)
  - Federal Highway Administration (FHWA)
- Environmental Protection Agency (EPA)
- National Aeronautics and Space Administration (NASA)
- National Science Foundation (NSF)
- U.S. Department of Agriculture (USDA)
  - Agricultural Research Service (ARS)
  - Forest Service (FS)
  - National Institute of Food and Agriculture (NIFA)



# 1. Bevezetés

## A nanotudomány/technológia fontosabb részterületei

- **nanoelektronika:** a nanotechnológia alkalmazása elektronikus eszközökben ill. azok létrehozásához.
- **nanometrológia:** mérés technika és mikroszkópia a nanotartományban (pl. transzmissziós és pásztázó elektronmikroszkópia, atomerő mikroszkópia stb.)
- **nanofluidika:** folyadék manipulálása (mozgatása), az áramlás viselkedésének tanulmányozása a nl-es térfogatok nagyságrendjében.
- **nanoengineering:** a nanotechnológia szinonimájaként is használják, de ez a mérnöki aspektusra fókuszál a tudományos megközelítéssel szemben
- nanomedicine, nanotoxicology, nanobiotechnology, stb.

# 1. Bevezetés

## Bio- és nanoszenzorika definíciók

➤ **bioszenzor:** olyan érzékelők, melyek **biológiailag aktív** anyagokat alkalmaznak érzékelési célra és képesek komplex mintában nagy szelektivitással célanyagok koncentráció mérésére (csoportosítás az érzékelési folyamat/kölcsönhatás alapján és nem a mérendő tulajdonság alapján) (Harsányi).

➤ **nanoszenzor:** Nanosensors are chemical or mechanical sensors that can be used to **detect the presence of chemical species and nanoparticles**, or monitor physical parameters such as temperature, **on the nanoscale**. They also find use in medical diagnostic applications. (nature.com)

# 1. Bevezetés

**A nanotechnológia fontosabb eddigi eredményei – megkülönböztetés:**

## **Nano-enhanced:**

Akkor nevezhetünk így egy eszközt/terméket/technológiát, ha az a nano-komponens (nanoanyagok) jelenléte nélkül is működőképes lenne fizikailag, azonban a nano-komponens jelenléte jelentősen javít az eszköz/termék tulajdonságain. Példa: nanokompozit PET palackok.

## **Nano-enabled:**

Egy eszköz/termék/technológia akkor, ha a nano-komponens nélkül az eszköz fizikailag nem működőképes. A nano-komponens esszenciálisan hozzájárul a makroszkopikustól eltérő fizikájával ahhoz, hogy az eszköz egyáltalán működhessen. Példa: plazmonikus érzékelők. Okostextilek stb.

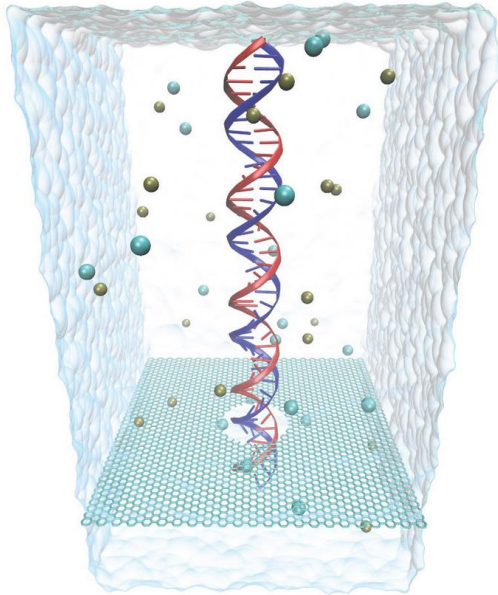


# 1. Bevezetés

Nano-enabled és nano-enhanced: Példa – grafén

Nanopórusok

DNS szekvenálás



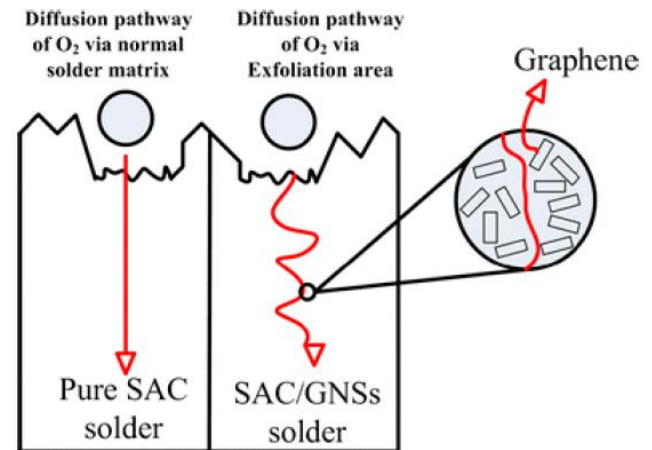
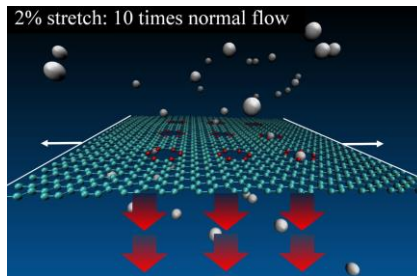
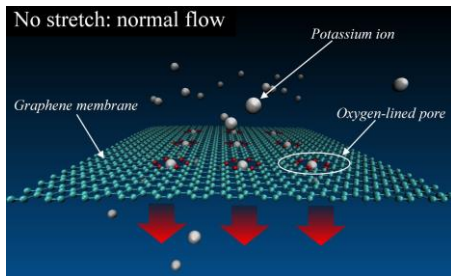
Nanokopozitok

Szerkezeti elemek,  
fogyasztói termékek

Korrózióálló  
forraszpasztta



Ionszeparáció -> energiacella, energy harvesting





# 1. Bevezetés

## A nanotechnológia fontosabb eddigi eredményei:

### Önkényes csoportosítás:

- tényleges piaci termékek (beépültek életünkbe),
- prototípus szinten működik, de még nem kész termék (nagy ígéretek),
- proof of concept, vagy technológia demonstráló „extrémítás”.

### Tényleges piaci termékek:

- elsősorban passzív, ritkábban aktív nanostruktúrák
- **adalékolt anyagok** jobb mechanikai, termikus stb. tulajdonságok elérésére pl. CNT\* adalékolt teniszütő váz, nano-SiO<sub>2</sub> adalékolt beton, Cu NP\* adalékolt csomagolóanyag, szélvédőmosó folyadék stb.
- **kozmetikai eszközök:** pl. TiO<sub>2</sub>, ZnO adalékolt naptejek és krémek leégés ellen, Ag NP antibakteriális hatása, módosított fullerének antioxidáns hatása.
- **bevonatok, festékek:** adaléktól függően antisztatikus, antibakteriális, szuperhidrofób, öntisztuló stb. hatás. (pl. Ag NP, CNT, TiO<sub>2</sub>)...de ruhák esetében is hasonló anyagokkal, hasonló funkciók.



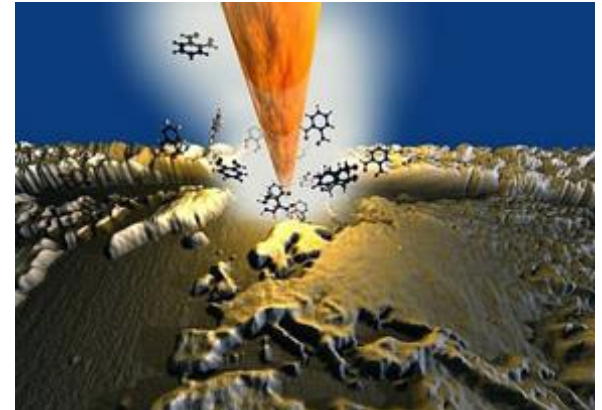
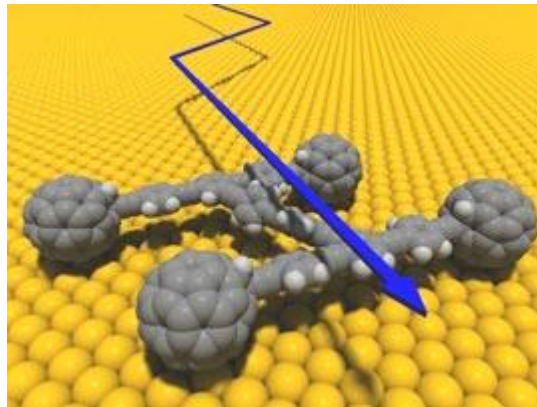
# 1. Bevezetés

## Prototípus szintű eredmények, ígéretetek:

- **grafén**, és grafént alkalmazó rugalmas kijelzők,
- **nanomedicine**: pl. betegség diagnosztikában, **bioérzékelők**, hatóanyagok célzott bevitele, lokalizált rákterápia (intelligens hatóanyag) stb.
- nano-elemeket alkalmazó, jobb tulajdonságokkal rendelkező érzékelők, **nanoérzékelők**,
- **nanoelektronika** (nano-elemekkel kiegészített mikroelektronikai alkalmazások és szorosan kvantummechanikai elveken alapuló eszközök is).

## Extremitások (technológia demonstráció):

- nano-auto (2006),
- nano-térkép (2010),
- [nano.gov](http://nano.gov)

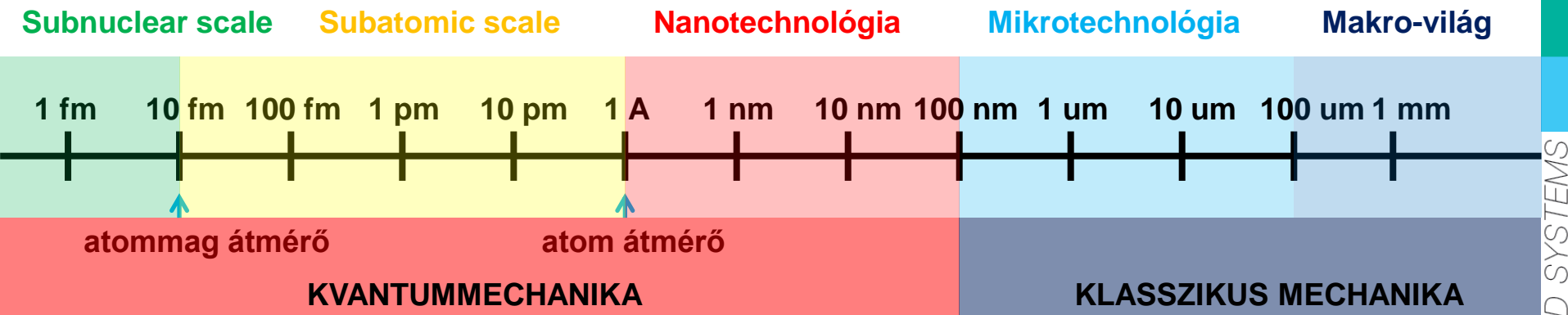


# 2. Nanoorientáció

Nanoszerkezetű anyagok (nanostruktúrák) definíciója (NNI):

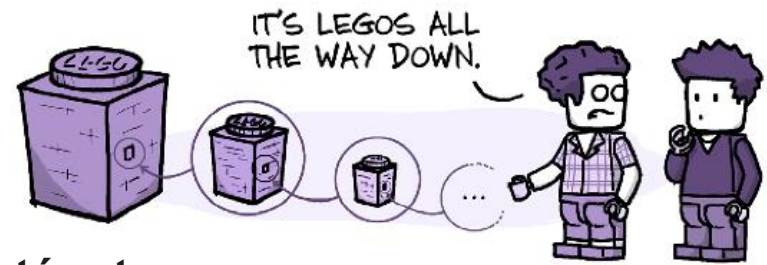
Legalább egy irányban 100 nm alatti méret

De honnan jön ez a 100 nm ???



- A 100 nm a kvantummechanika hatáskörének felső határa, vagyis a nanotudomány egész területe definíció szinten is kötve van a klasszikustól eltérő jelenségekhez, amit a kvantum hatások okoznak.
- Bár az elterjedt definíciók csak felső korlátot adnak meg (100 nm), az alsó tartományon nem jellemző, hogy a nanotudomány behatoljon a szubatomi, vagy magfizikához tartozó területekre (alapvető építőelem az atom).

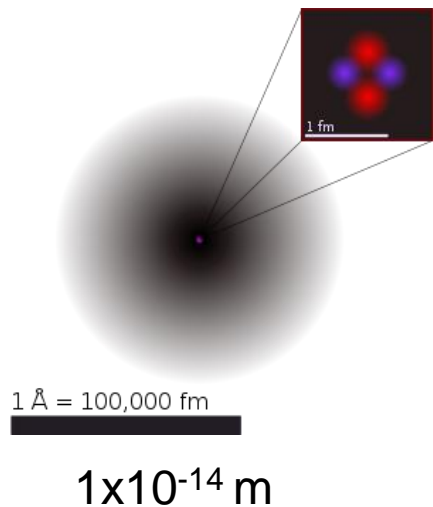
# 2. Nanorientáció



## Az atom (mint nanotechnológiai alapkő) története:

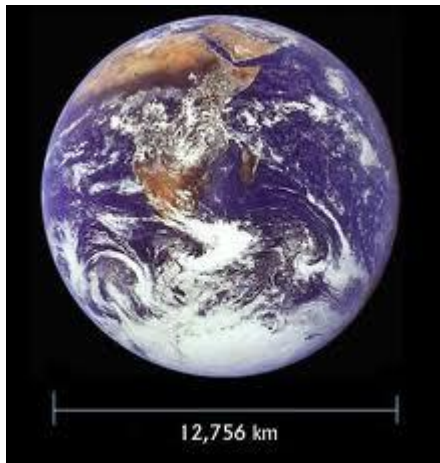
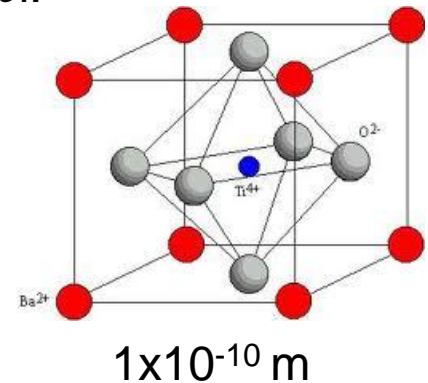
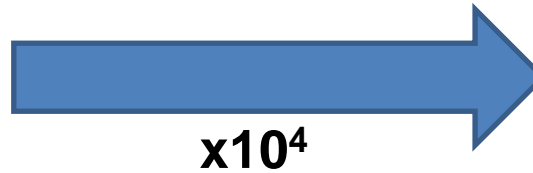
- Az ókori görögök (Empedoklész ~i.e. 450) négy eleme és tulajdonsága
- Arisztotelész (~i.e. 330) folytonos anyaga
- Atom = oszthatatlan Demokritosz (~i.e. 420), atomisták
- 1803 John Dalton – molekulákká csoportosulás arányai
- 1905 Einstein – Brown mozgás magyarázata
- 1897 Thomson – elektron felfedezése: az atom nem is oszthatatlan
- 1904 Thomson – ‘szilvás puding’ atommodell
- 1911 Rutherford – pozitív atommag felfedezése, ‘planetáris’ modell
- 1913 Bohr – rögzített elektron pályák és energia állapotok
- 1932 Chadwick – neutron is van a magban
- 1964 Murray Gell-Mann – kvark elmélet (felfedezésük egészen 1990ig)
- Azóta: Standard modell, Higgs-bozon stb.

# 2. Nanoorientáció – méretskálák



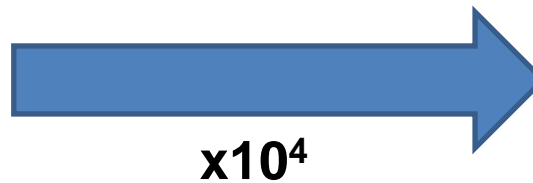
Atommag  
átmérője

Atomok távolsága pl.  
ráciban



Föld  
átmérője

Föld-Nap  
távolság



$1,3 \times 10^7$  m

$1,5 \times 10^{11}$  m

## 2. Nanoorientáció

### A kvantummechanika hatásköre – meddig tart?

Gribbin „kockacukor” hasonlata

Kiindulás Plack-állandó:  $6,55 \times 10^{-27}$  ergs (erg: g, cm, s rendszer)

Elektron tömege:  $9 \times 10^{-28}$  g – ebben a nagyságrendben „hat”.

Hasonlítsuk valami számunkra megfogható dologhoz:

Vegyünk  $10^{27}$  db 1 cm-es kockacukrot ( $10^{27}$  cm)

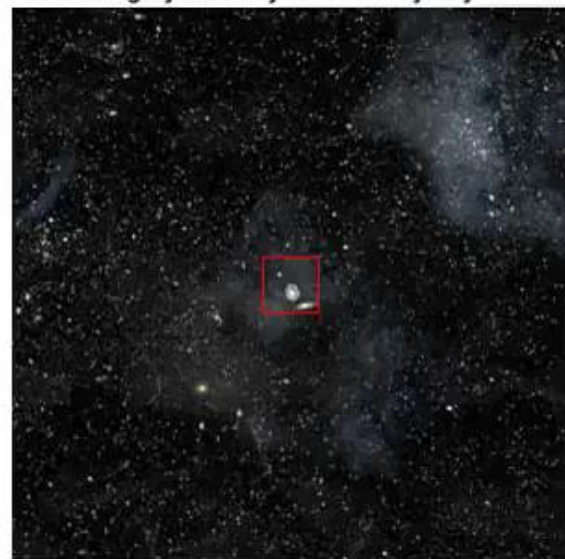
Egy fényév kb.  $10^{18}$  cm -> kockacukor sorunk hossza  $10^9$  fényév

Ismert legtávolabbi galaxis távolsága  $10^{10}$  fényév



**Az ember a logaritmikus  
hosszskála közepén**

10 million light years away from the Milky Way.



$10^{+23}$  meters

1.0 s

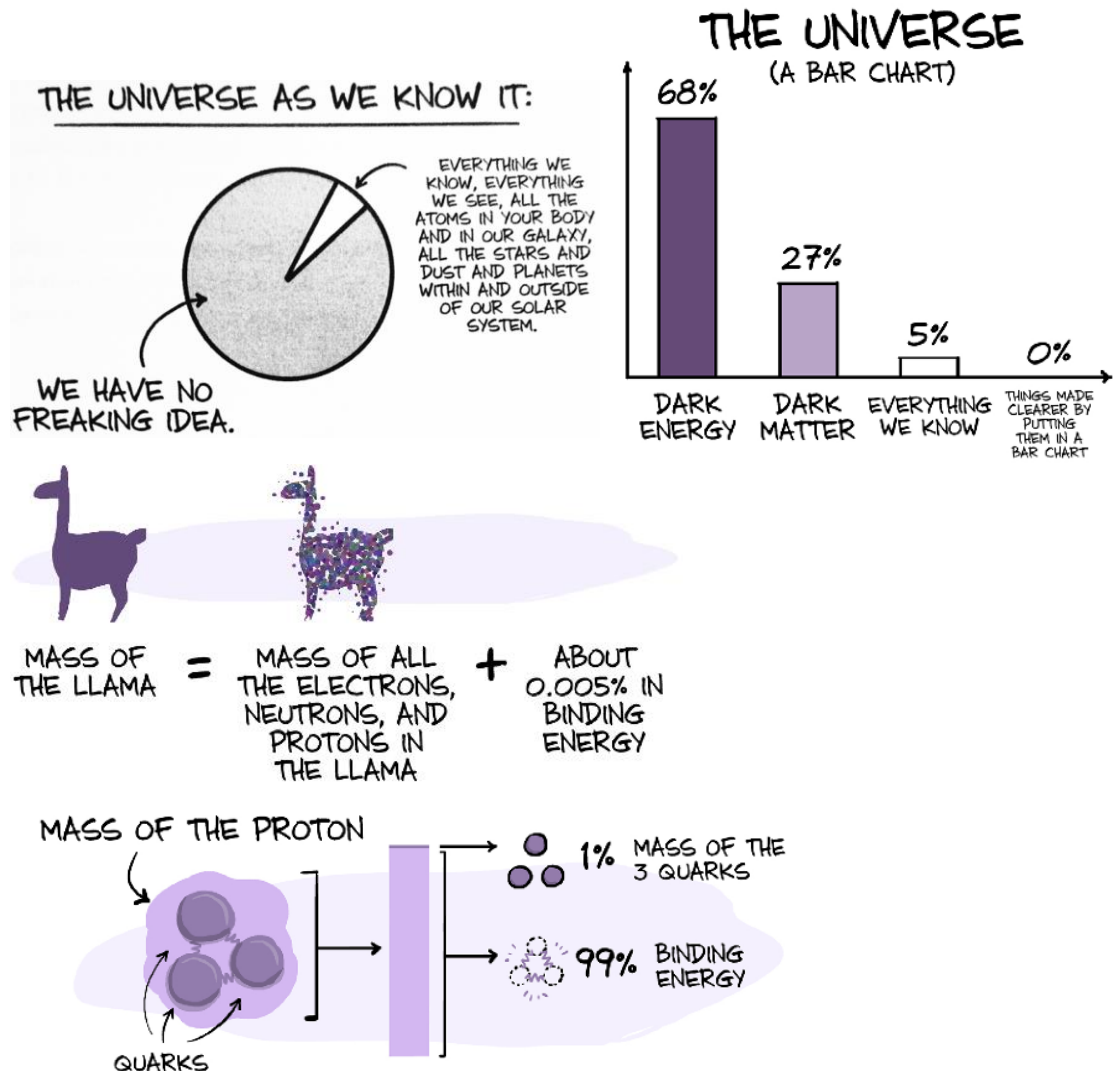
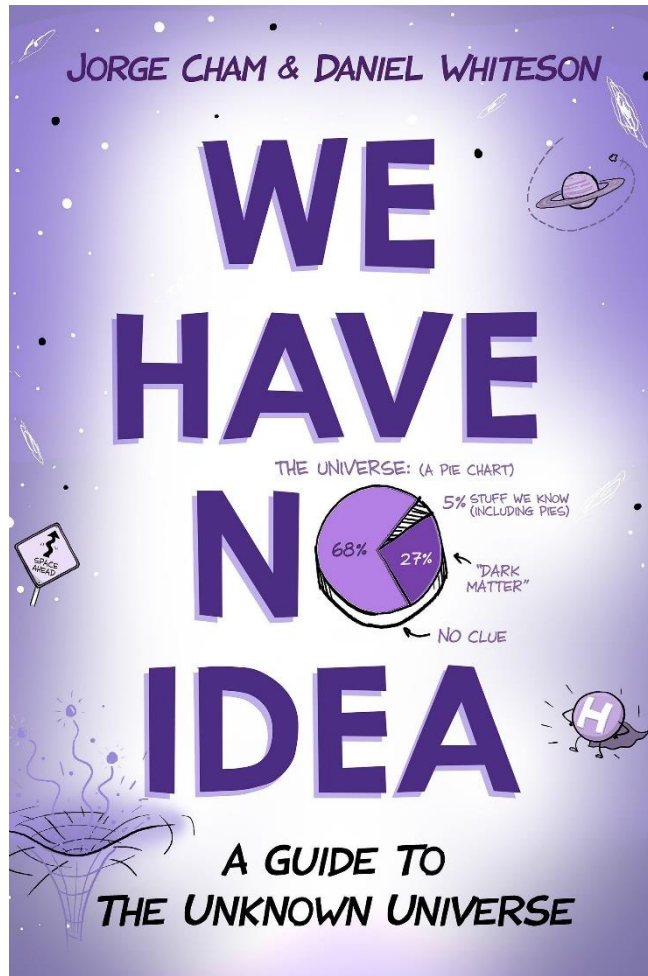
10 million light years





# 2. Nanoorientáció

## Miért nem hatol be a nanotudomány a szubatomi skálára?



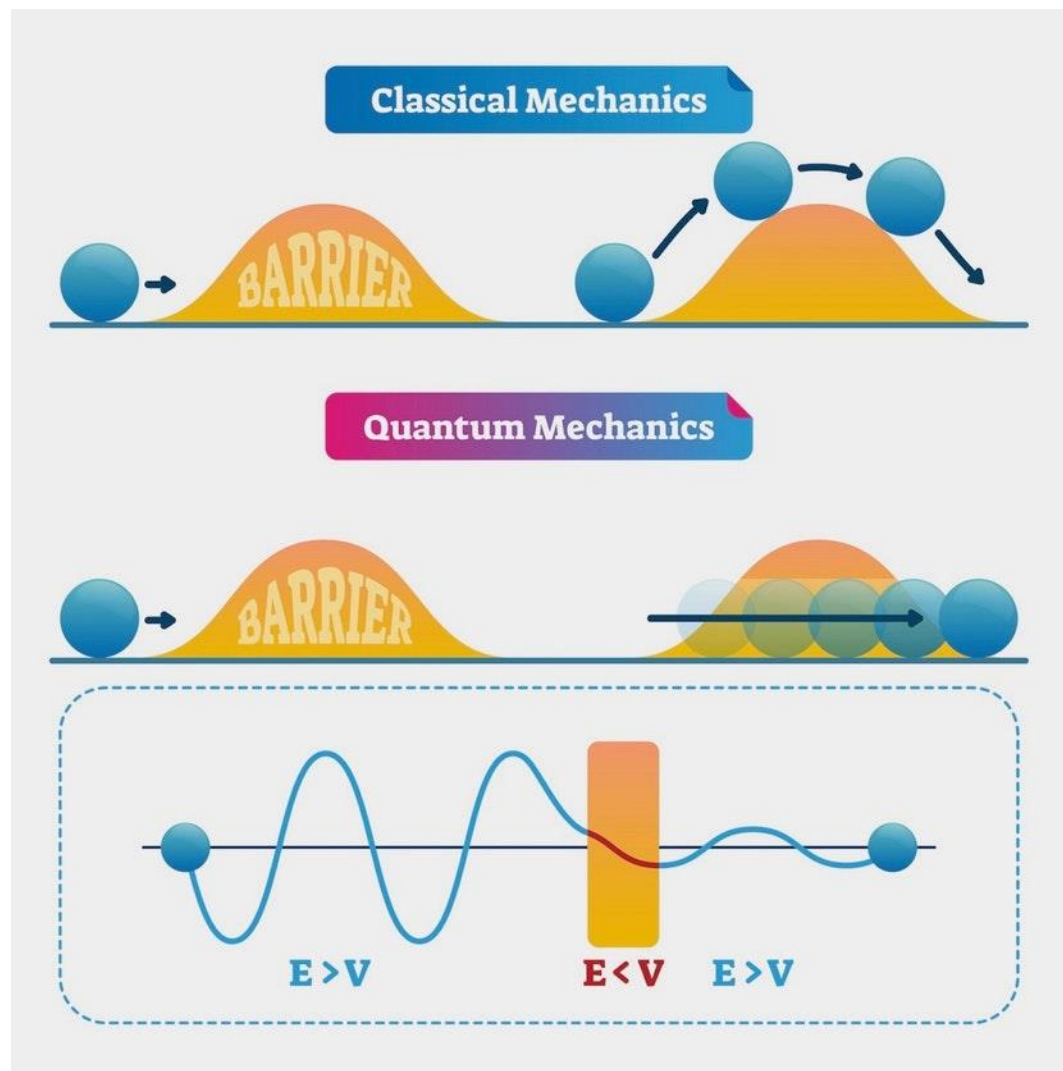


# 2. Nanoorientáció

## Klasszikus kvantummechanikai effektusok – Alagúthatás

**Friss hír:** az elektron potenciálgáton történő áthaladása „azonnali”, (vagyis attoszekundumos lézerrel nem mérhető ki zajszint alatti idő, arra, amit a potenciálgát „belsejében” tölt az elektron)

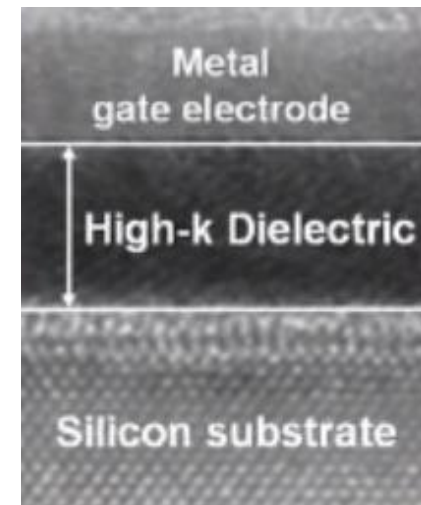
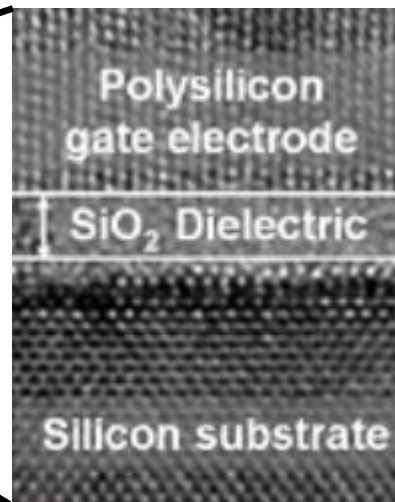
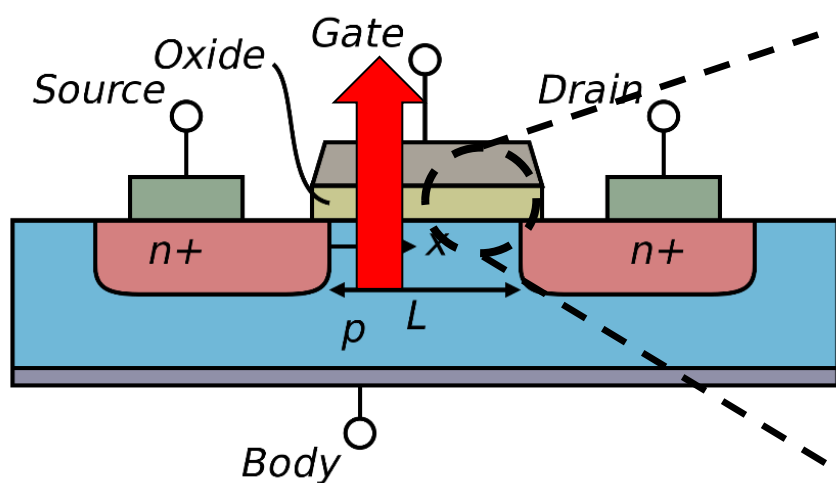
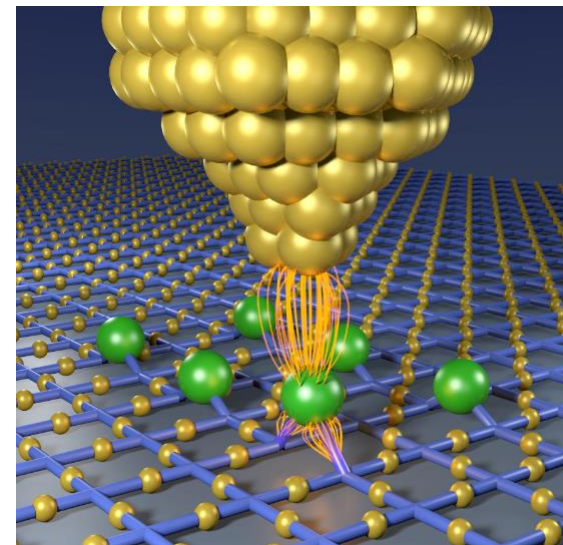
<https://cosmosmagazine.com/physics/quantum-tunnelling-is-instantaneous-researchers-find>



# 2. Nanoorientáció

Az alagúthatás egyszerre nagy lehetőség és nagy probléma

- atomi szintű képzés és manipuláció pásztázó alagútmikroszkóppal,
- nagy mennyiségű feleslegesen elszivárgó és disszipáló áram a nanoelektronikában.



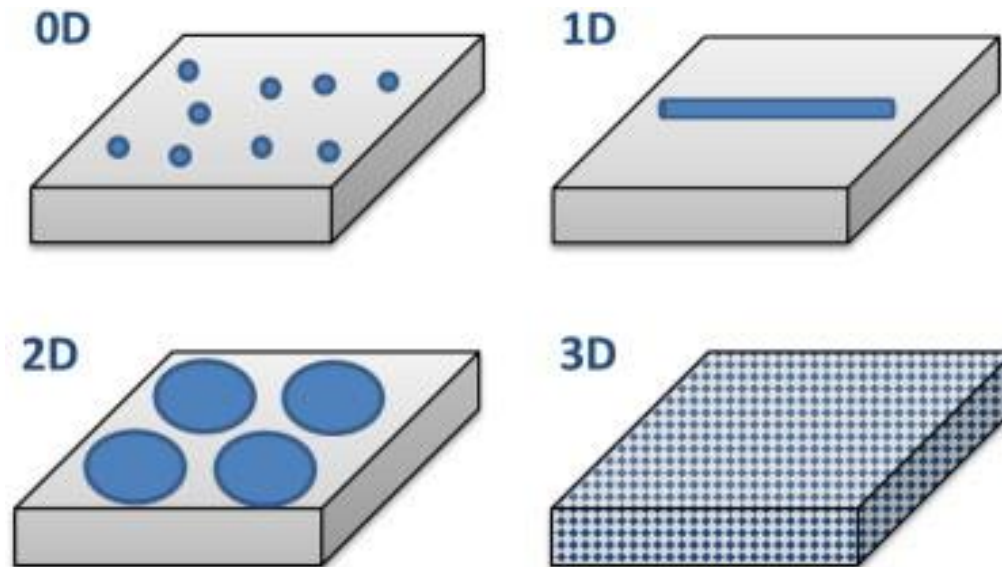
$$T \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} e^{-2\alpha L}$$

# 3. Nanoanyagok csoportosítása

Nanoszerkezetű anyagok (nanostruktúrák) definíciója (NNI):

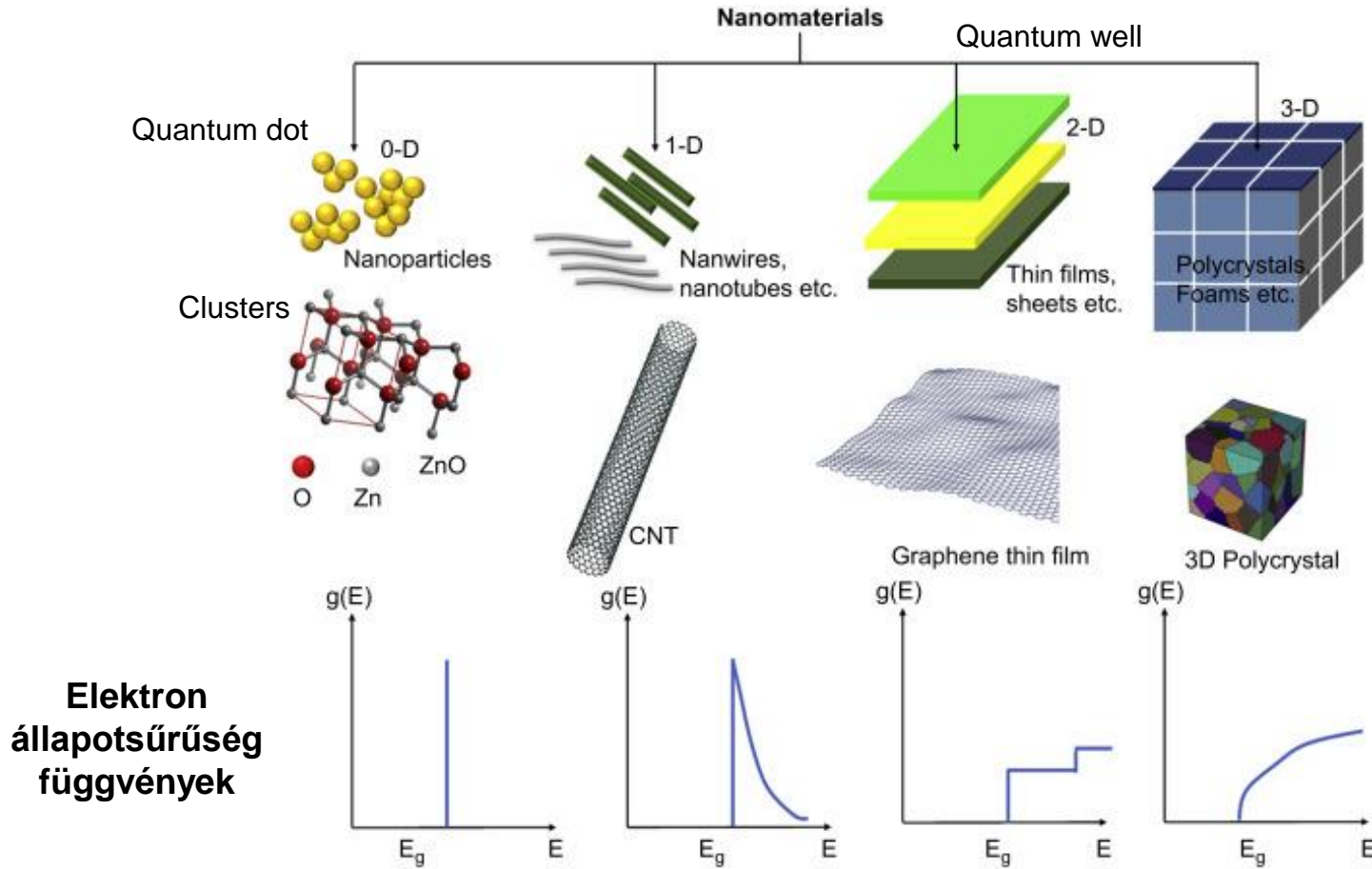
Legalább egy dimenzió mentén 100 nm alatti méret

Attól függően, hogy hány dimenzió mentén teljesül (vagy sem) ez a korlátozás megkülönböztetünk 0D, 1D, 2D és 3D-s nanoanyagokat



# 3. Nanoanyagok csoportosítása

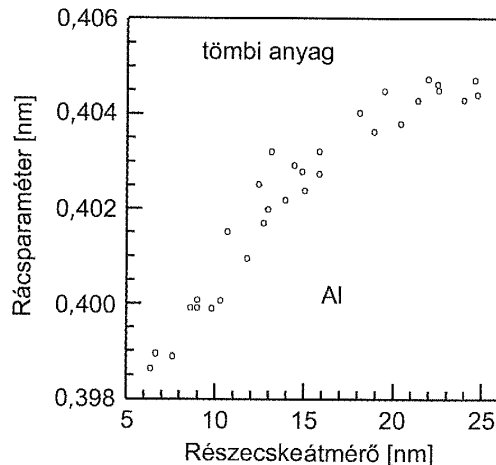
Példák – kvantum korlátozottság (quantum confinement)



# 3. Nanoanyagok csoportosítása

## Nanoméretű részecskék, klaszterek (0D)

- a geometriai alak változatos lehet
  - közel gömszerű (equiaxiális), kocka, hasáb, koplex (izokaéder), héjszerkezet
  - az alak (azonos anyagnál is) változhat a részecske méretével
- lehet egykristály és polikristály is
- fém nanoszemcsék -> a rácsállandó függ a részecske átmérőjétől
  - rácskontrakció
  - oka: felületi atomok arányának növekedése, „felületi nyomás”
- klaszter: max. néhány ezer atom, átmenet az atom és a tömbi anyag között
- könnyen bejut a szervezetbe -> egészségügyi, kockázat?



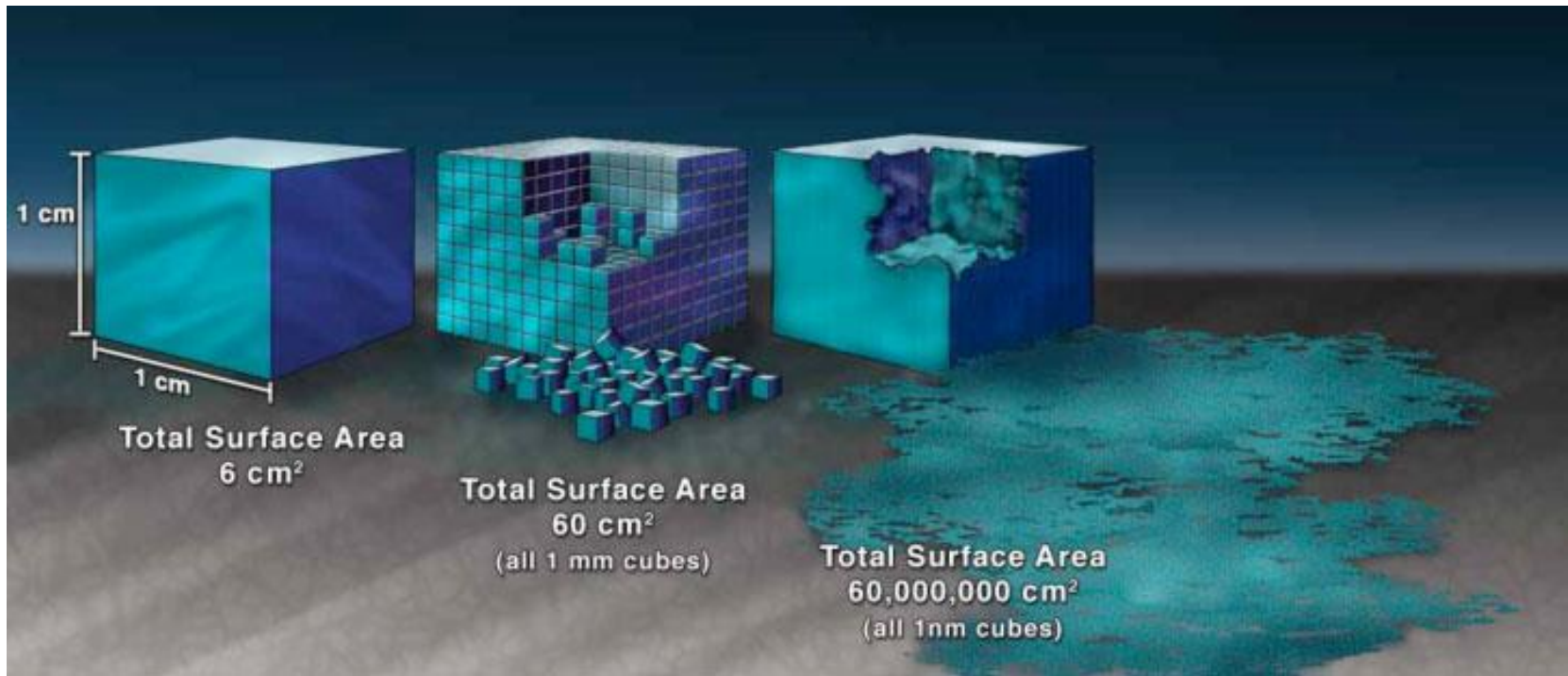
Héjak száma	Összes atom száma	Felületi atomok aránya
0	1	100%
1	13	92%
2	55	76%
3	147	45%



# 3. Nanoanyagok csoportosítása

Felületi atomok arányának növekedése – illusztráció:

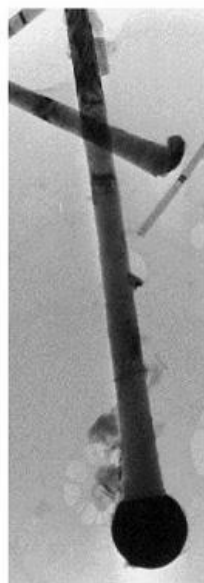
Kérdés: miért „édesebb” a porcukor, mint a kristálycukor?



# 3. Nanoanyagok csoportosítása

## Nanoméretű szálak, rudak, csövek (1D)

- jellemzésükre a hossz/átmérő arányt használják (aspect ratio)
- szinte minden anyagból lehetséges előállítani
  - fémek, nemfémes, félvezető, vegyületek (oxidok, nitridek stb.)
- nanocsöveket csak réteges szerkezetű anyagokból lehet csinálni (pl. grafit)
- alkalmazás szenzorikában, illetve nano- és optoelektronikai eszközökben



400 nm  
GaAs



SWNT



MWNT



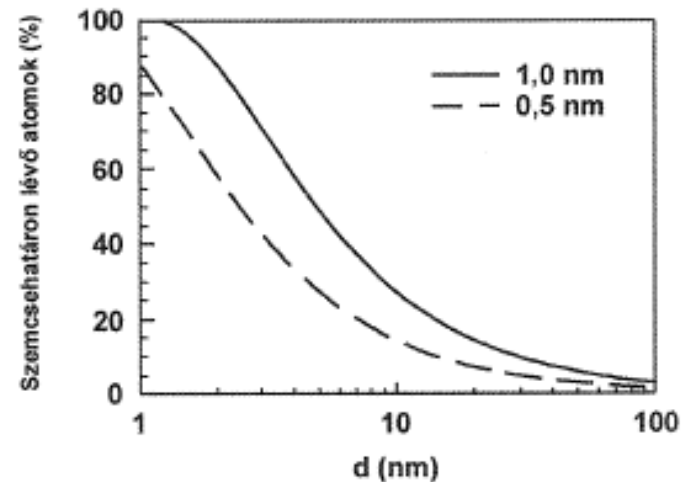
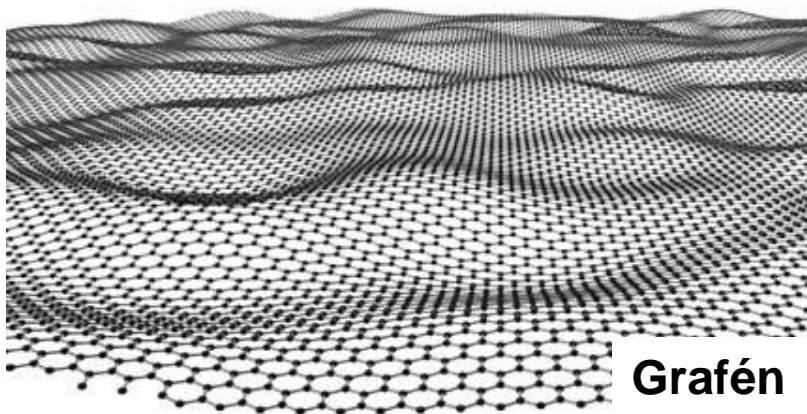
# 3. Nanoanyagok csoportosítása

## Nanoméretű vékonyrétegek és bevonatok (2D)

- vékonyrétegek mikroelektronikai technológiákkal (PVD, CVD, MBE)
- atomi vastagságú rétegek pl. grafén
- nanorétegek szendvicsszerkezetben -> kvantummechanikai hatások pl. alagúteffektus -> spintronikai eszközökben alkalmazhatók

## Nanokristályos anyagok (3D)

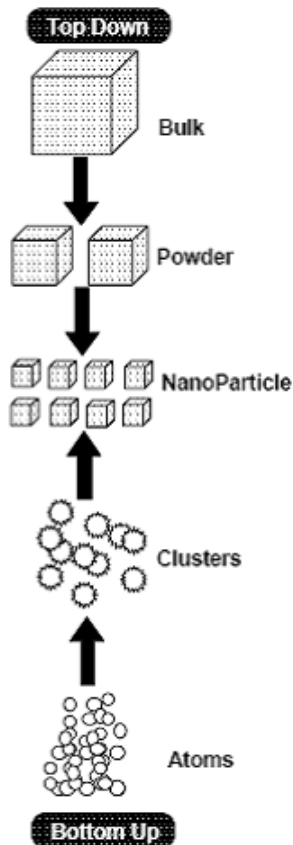
- polikristályos anyag, de nanokrisztallitokkal
- a szemcsehatárokon lévő atomok száma megnő -> tulajdonságok változása



# 3. Nanoanyagok csoportosítása

A nanostruktúrált anyagok előállításának alapvető irányai:

**Top-down és Bottom-up építkezés!**



- alulról felfelé alapvető építőegységekből indulunk ki, amik atomok vagy molekulák,
- az **önszerveződés** a természet egyik kedvelt módszere dolgok létrehozására -> önszerveződő rétegek (külön előadás).

	Alulról felfelé		Felülről lefelé	
Kémiai reakciók	Önszerveződés	Elhelyezés	Litográfia	Vágás, nyomás, esztergályozás
Molekulák	Kristályok rétegek, csövek	Kísérleti atomi vagy molekuláris eszközök	Elektronikus eszközök	Megmunkált felületek
Kozmetikumok, üzemanyag adalékok	Kijelzők		Komputeres chipek MEMS-ek	Jó minőségű optikai gödör lézerek

## **Felhasznált és ajánlott irodalom:**

Konczos Géza: Bevezetés a nanoszerkezetű anyagok világába

Mojzes Imre, Molnár László Milán: Nanotechnológia

Bharat Bhushan: Springer Handbook of Nanotechnology

Bharat Bhushan: Handbook of Micro/Nano Tribology (CRC)

## **Tudományos ismeretterjesztő irodalom:**

Jorge Cham, Daniel Whiteson: We Have No Idea

Stephen Hawking: Az idő rövid története

Richard P. Feynman: A fizikai törvények jellege

John Gribbin: Schrödinger Kiscicái és a valóság keresése

## Ajánlott internetes oldalak:

### **NNI: National Nanotechnology Initiative**

Legfrissebb nanoval kapcsolatos hírek

- [nano.gov](http://nano.gov)

Nanotechnológiai adattár és ingyenes online kurzusok

- [nanohub.org](http://nanohub.org)

Nano fogalmak, anyagok, alkalmazások:

- [understandingnano.com](http://understandingnano.com)
- [nanowerk.com](http://nanowerk.com)