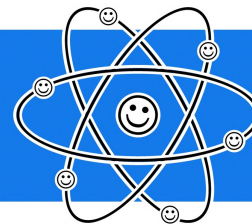
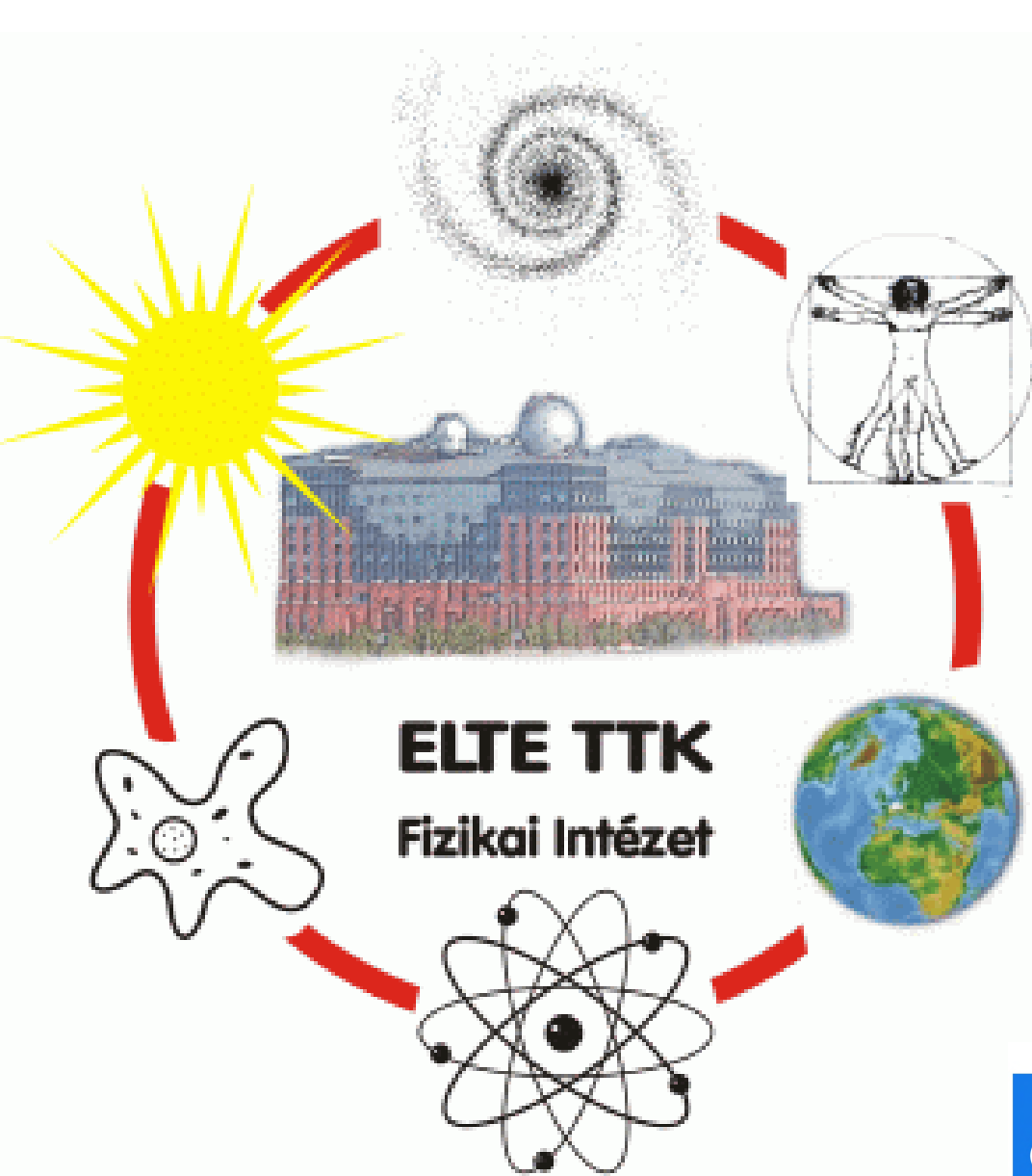




# Az atomoktól a csillagokig

# 200.

**ELTE TTK**  
Fizikai Intézet



A fizika mindenkié





# Struktúrák térben, időben és téridőben 1.

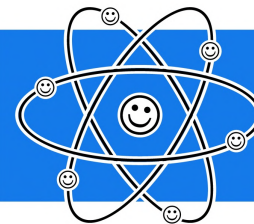
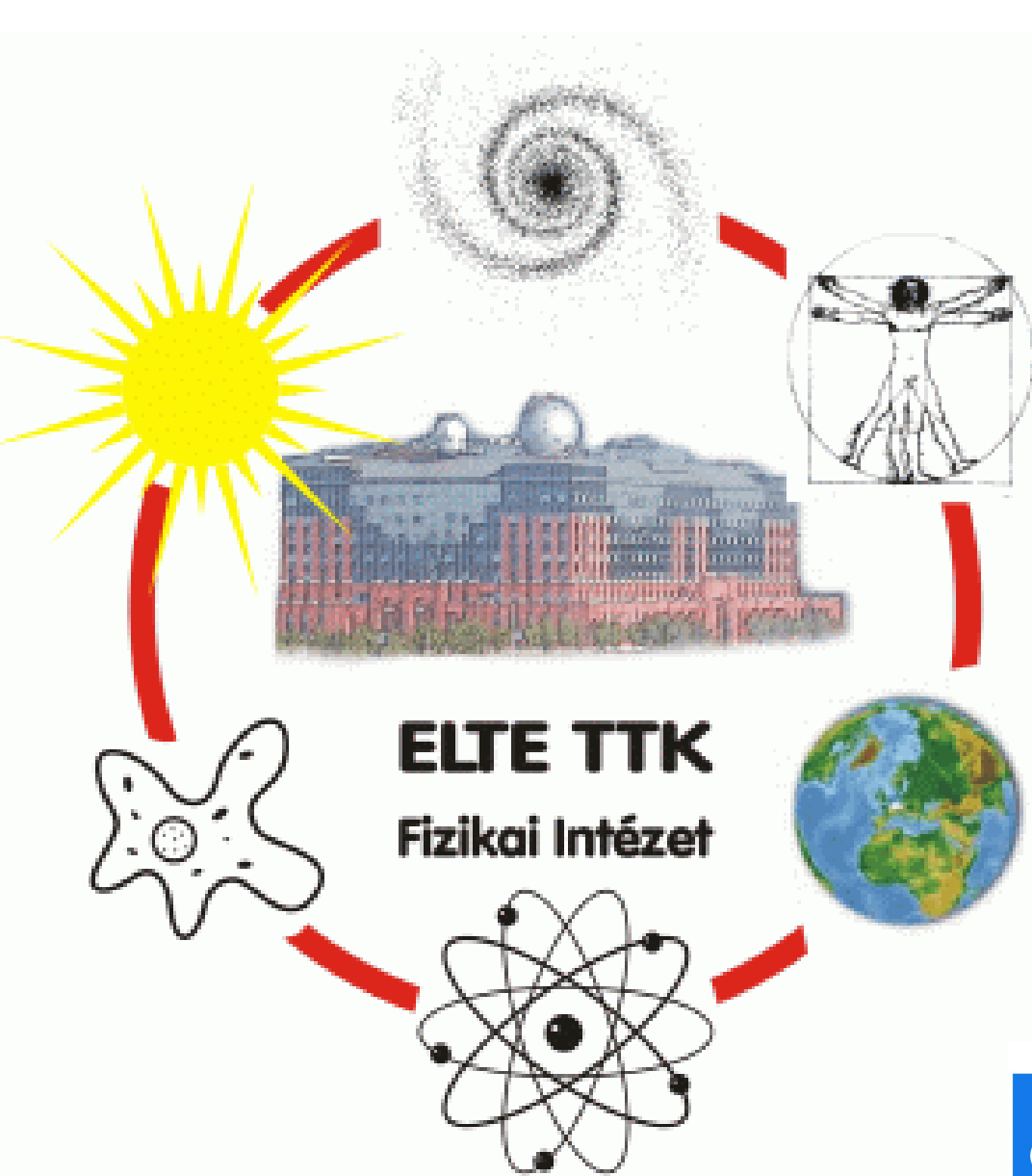


Dávid Gyula  
2019. 10. 10.

# Az atomoktól a csillagokig

# 200.

**ELTE TTK**  
Fizikai Intézet



A fizika mindenkié



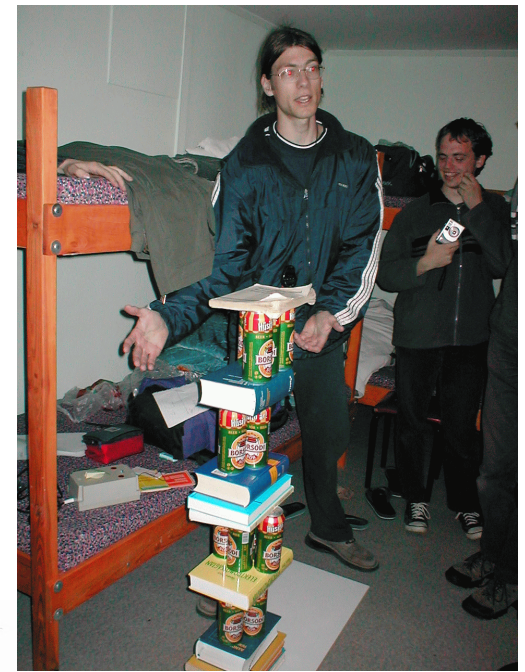
# Az építészek térbeli struktúrákat hoznak létre



## A szobrászok is...



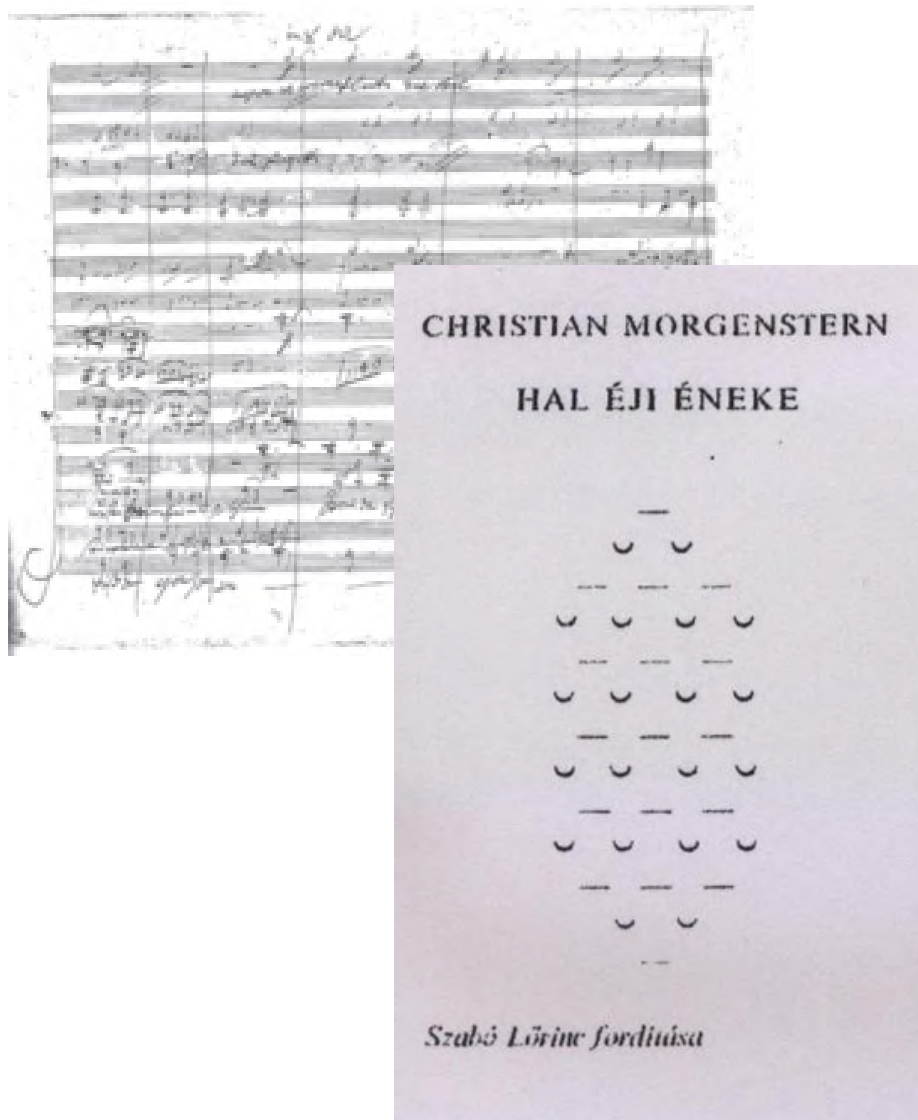
# Olykor a fizikusok is térbeli struktúrákat hoznak létre



# A zenészek és a költők időbeli struktúrákat alkotnak

La Marseillaise  
National Anthem of France

Claude Joseph Rouget de Lisle, 1792



1. Al-lons, en-fants de la Pa-tri-e, Le jour de gloire est ar-ri-vé; Con-tre  
nous de la ty-ra-ni-e, L'é-tend-dard san-glant est la-vé. L'é-ten-dard san-glant est le  
vé. En-ten-dez-vous dons nos cam-pa-gnes mu-gir ces fa-rou-ches sol-dats. Ils  
vien-nent jus-que dans nos bras é-gor-ger vos fils, vos com-pag-nes. Aux  
ar-mes ci-toy-ens! For-mez vos ba-tail-lons, Mar-chons! Mar-  
chons! Qu'un sang im-pur A-breuve nos si-llons.

bethsnotes.com





Vannak térben és időben egyaránt strukturált jelenségek is

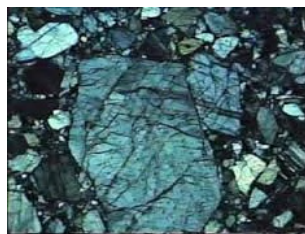


# A fizikusok is konstruáltak egyszerre térbeli és időbeli struktúrákat

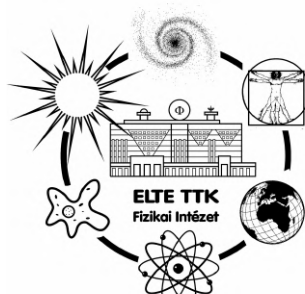
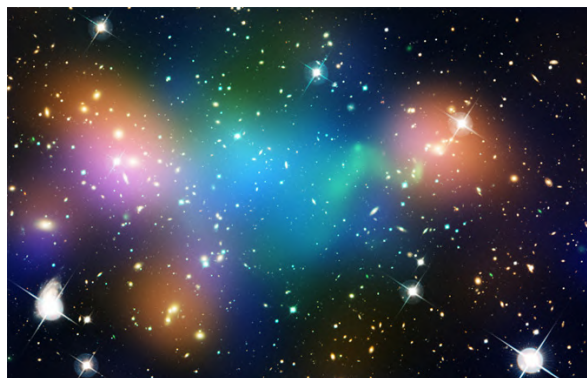


De a természet már jóval korábban létrehozta a maga struktúráit!

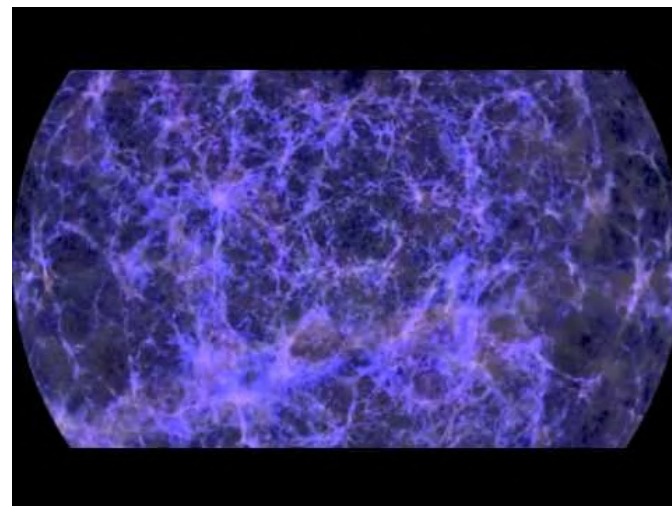
## A világ tele van térbeli és időbeli struktúrákkal

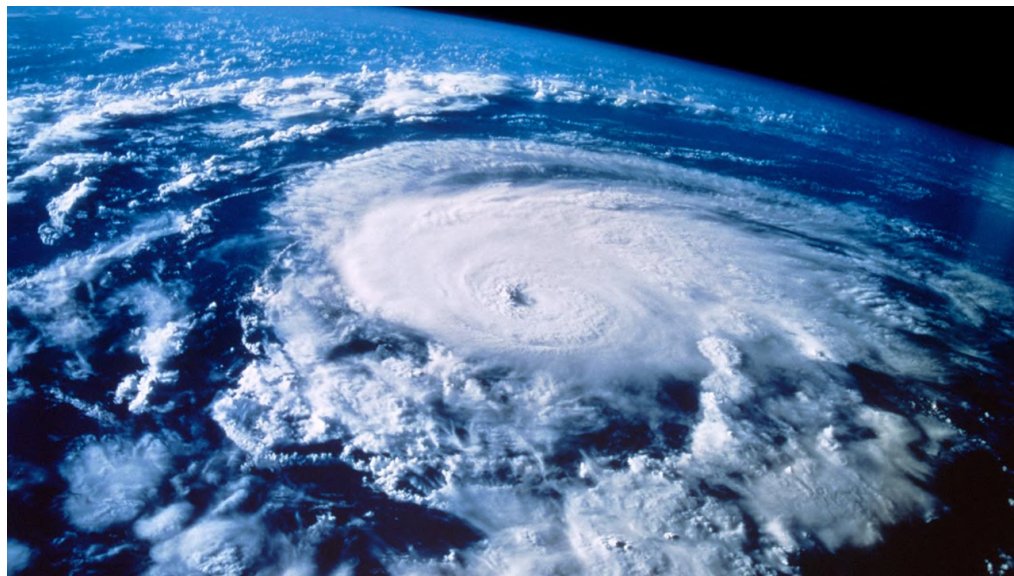
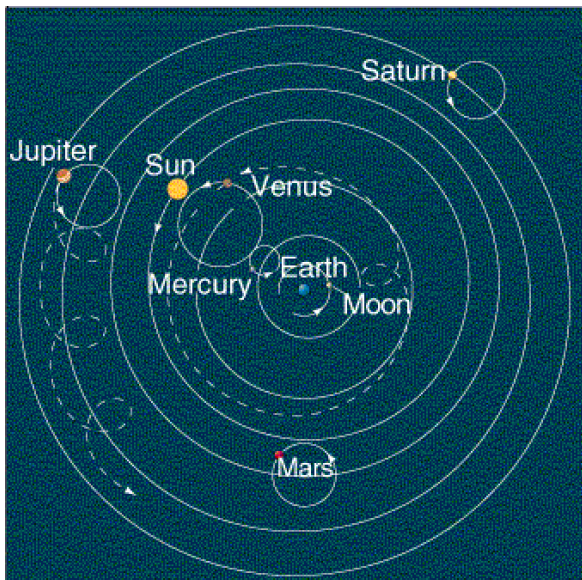


az atomoktól a csillagokig

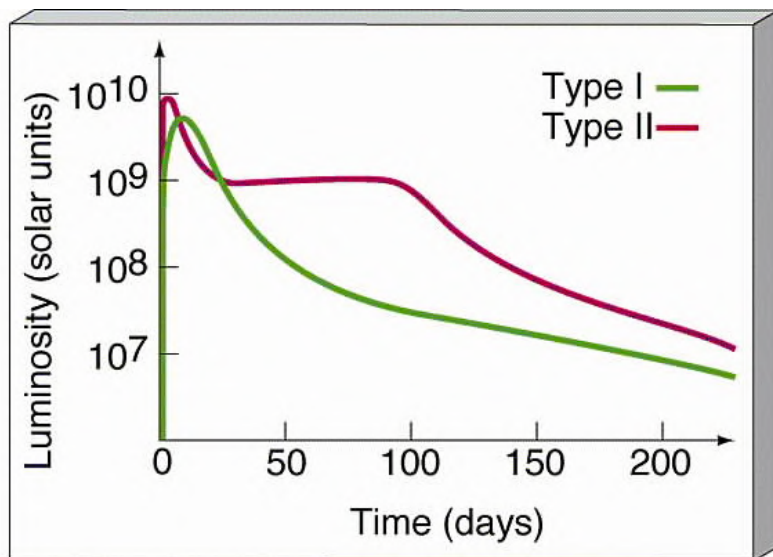


a kvarkoktól a galaxiscsipkéig

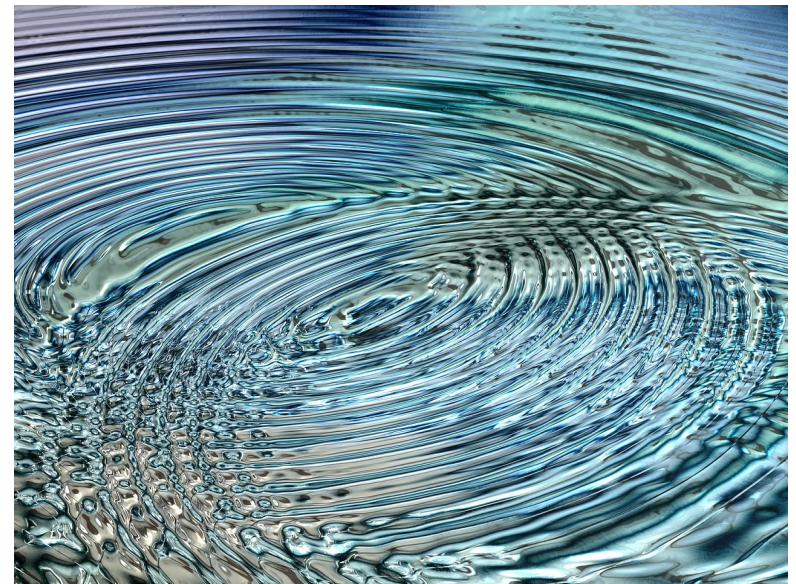
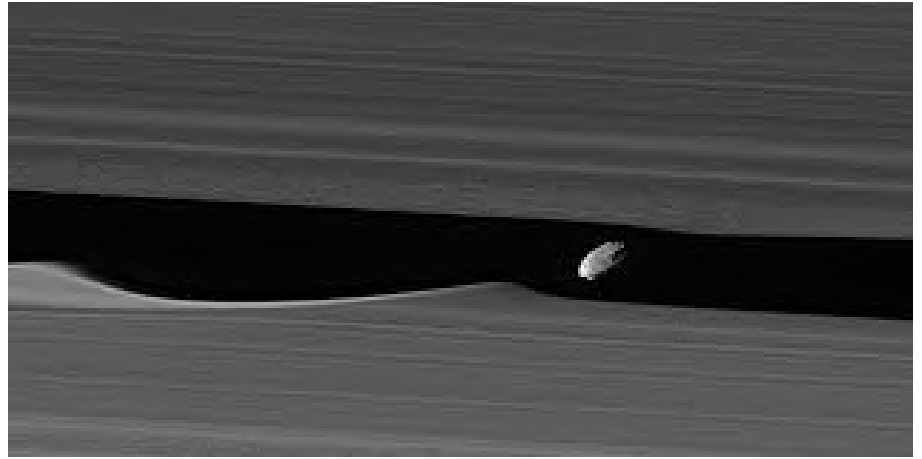




a forgó és keringő bolygóktól a robbanó csillagokig



a hullámok térbeli és időbeli struktúrája összekapcsolódik



**Térbeli struktúra:** kisebb alakzatok tartósan összekötött rendszere

fizikailag: kötött állapot

**Kérdések:**

- milyen részekből áll?
- milyen erő tartja össze?
- hogyan lehet szétszedni?
- mennyire stabil?
- meddig marad fenn?
- van-e több lehetséges állapota?
- meddig azonos önmagával?

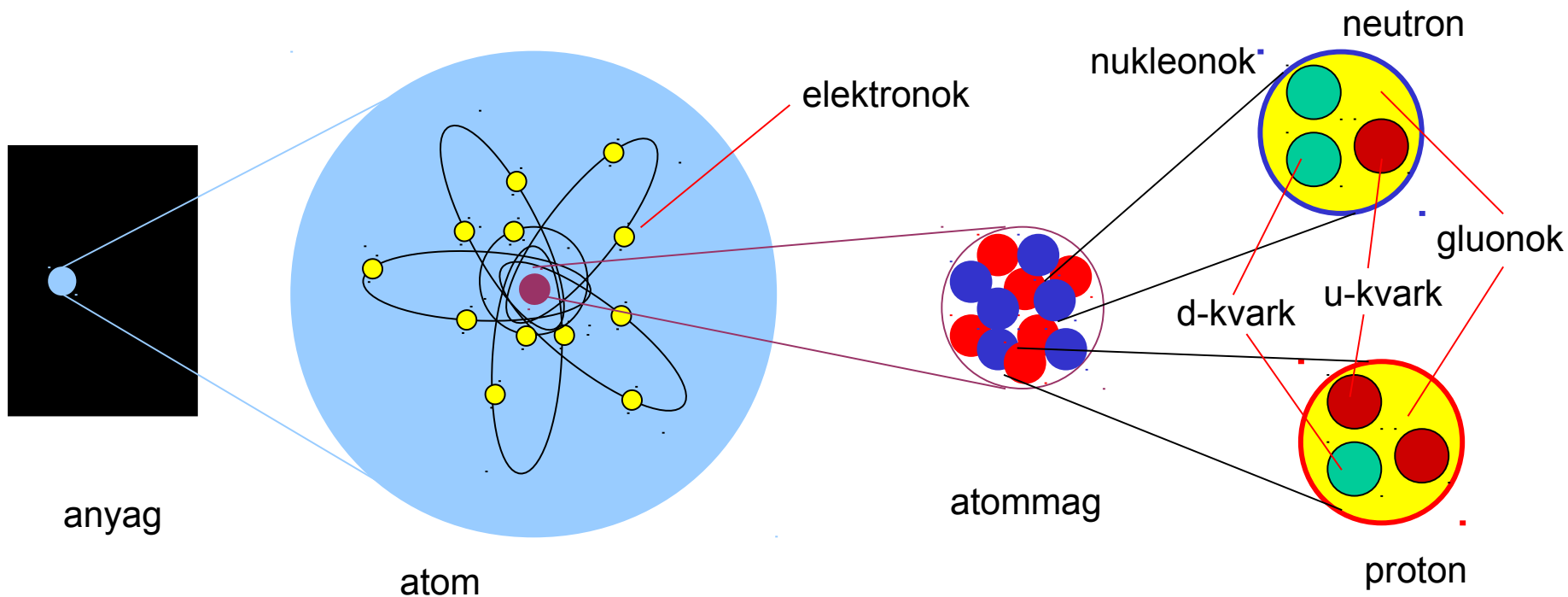
**Milyen folyamat hozta létre / pusztítja el?**



**Térbeli struktúra:** kisebb alakzatok tartósan összekötött rendszere

fizikailag: kötött állapot

Jellegzetessége: **minden szinten más a felépítés módja**

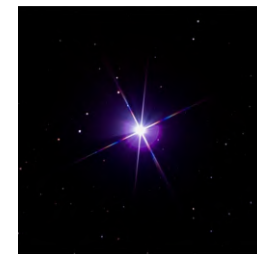
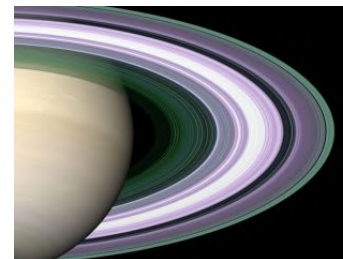
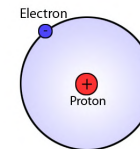


az atom nem Naprendszer!



# TÉRBELI STRUKTÚRÁK

- vannak teljesen egyformák, sok-sok példányban
- vannak tipikusan, de nem teljesen egyformák
- vannak teljesen egyediek  
(amíg nem találunk másik hasonlót)



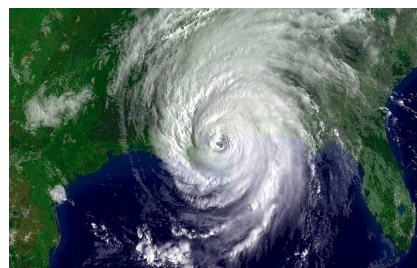
a Szaturnusz gyűrűje

## Fajták:

- ideiglenes, véletlenszerű
- ideiglenes, tényleges
- tartósan fennállók



Göncölszekér  
avagy Nagy Medve



Katrina hurrikán  
élőlények



atomok, molekulák, kövek, Föld, Nap, galaxisok



## A magasabb szintű struktúrák felépülésének közös szabályai:

- **kompartment szerkezet** (vö: Csányi Vilmos: Az evolúció általános elmélete)
  - a kisebb struktúrák a belső erők hatására lezárulnak, fix szerkezet
  - **egységként vesznek részt** a nagyobb struktúrák felépítésében

EZÉRT alakulhatott ki és működik a természettudomány!

Az egyes szintek egymástól függetlenül, saját módszerekkel, a többi szint ismerete nélkül vizsgálhatók.

### – energetikai elkülönülés

- a kisebb egységek szétszedéséhez több energia kell (szemben az ember által alkotott kütyük esetével)

EZÉRT nem működött az alkímia! (atom- és magfizika)

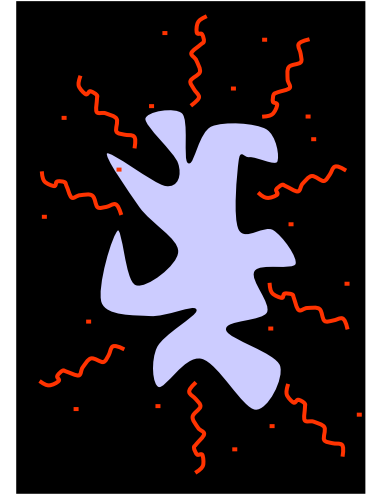


- **a struktúrák** nincsenek elszigetelve, **kölcsönhatásban állnak a környezetükkel**  
ennek mértéke a **hőmérséklet** (egy szabadsági fokra jutó átlagos energia)

A környezettel való kölcsönhatás speciális következménye:

- a folyamatok egyirányúsága
- **törekvés a legalacsonyabb energiájú állapot elérésére**  
(mert körülöttünk a jéghideg világűr!)

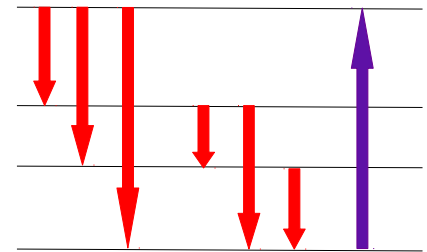
régen, a forró Univerzumban másképp volt!



- **extra fizikai szabály** a kvantumelmélet alapján:

- **a kötött állapotok diszkrét energiaszintjei**

közöttük nincs folytonos átmenet, csak ugrás,  
ehhez kell egy minimális energia

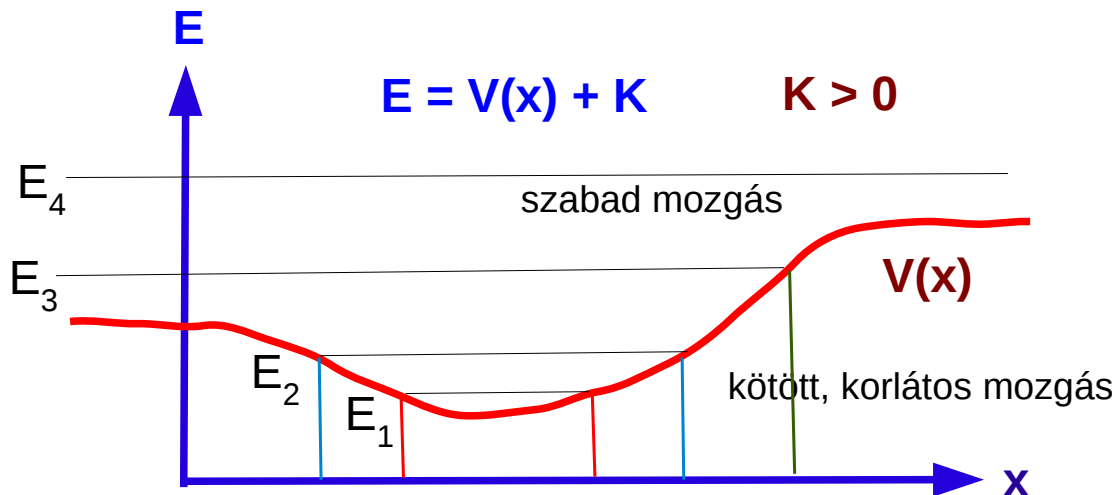
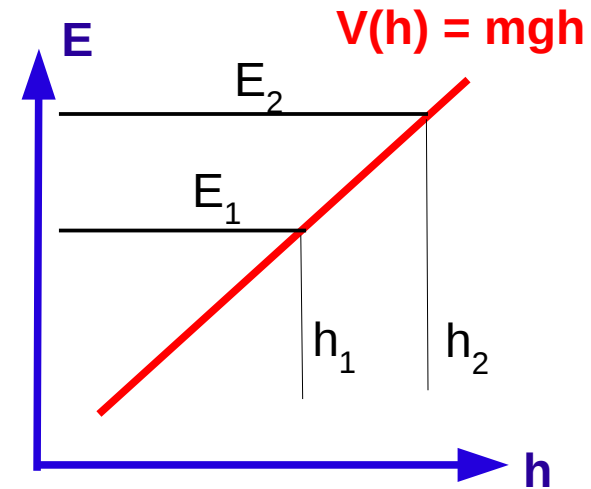


## Kötött állapotok fizikai leírása: potenciálgödör

Dobjunk fel egy követ: megáll és visszaesik

Oka: az energia megmaradása:  
mozgási + helyzeti energia = teljes energia

$$\left(\frac{1}{2}\right) m v^2 + m g h = E = \text{állandó}$$

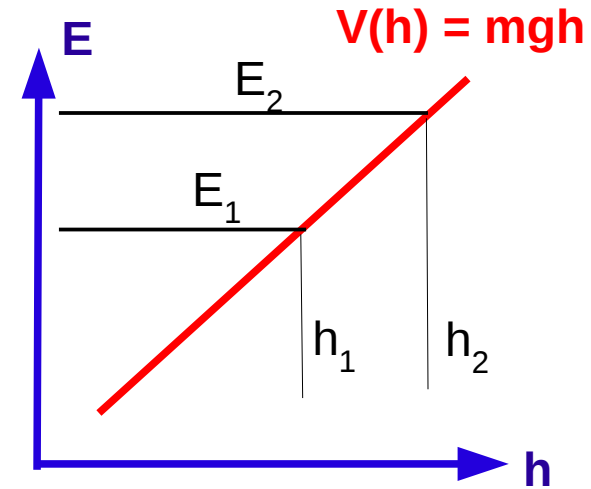


# Kötött állapotok fizikai leírása: potenciálgödör

Dobjunk fel egy követ: megáll és visszaesik

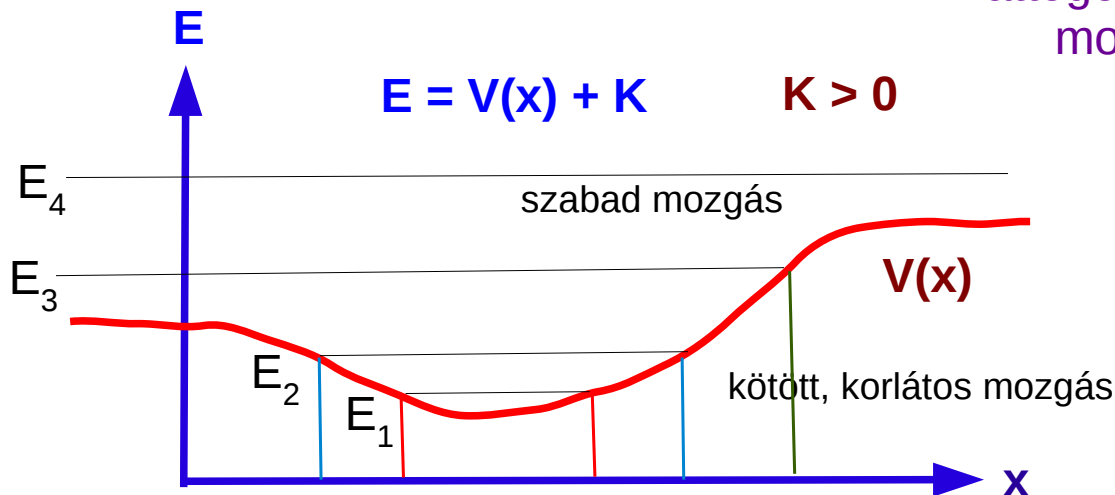
Oka: az energia megmaradása:  
mozgási + helyzeti energia = teljes energia

$$\left(\frac{1}{2}\right) m v^2 + m g h = E = \text{állandó}$$

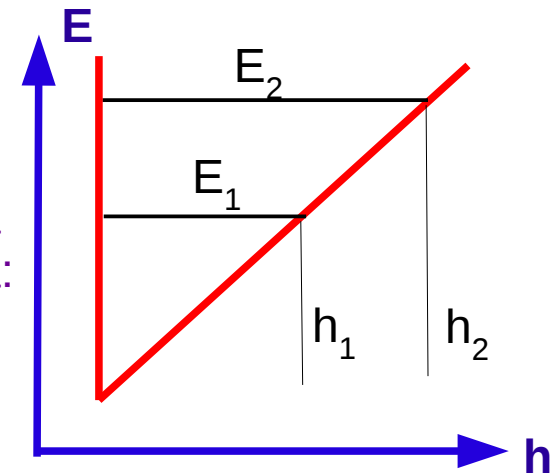


De mi van, ha visszaesik?

A mozgás a másik irányból is korlátos:  
**zárt potenciálgödör**



Pattogó labda mozgása:



## Kötött állapotok fizikai leírása: potenciálgödör

Dobjunk fel egy követ: megáll és visszaesik

Oka: az energia megmaradása:  
mozgási + helyzeti energia = teljes energia

$$\left(\frac{1}{2}\right) m v^2 + m g h = E = \text{állandó}$$

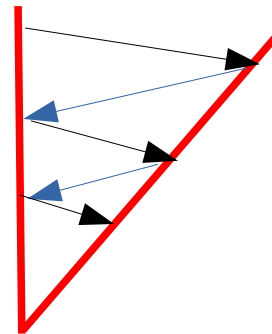
De mi van, ha visszaesik?

A mozgás a másik irányból is korlátos:  
**zárt potenciálgödör**

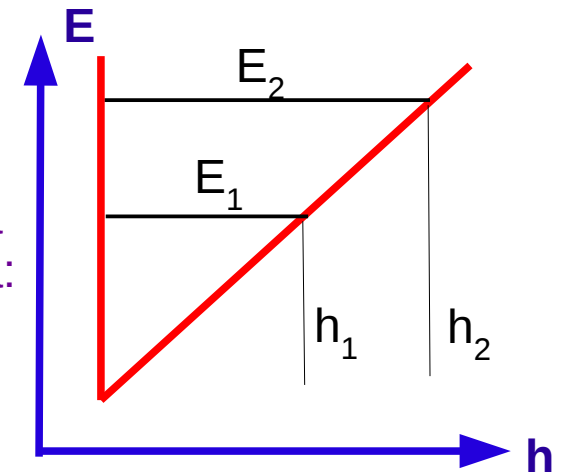
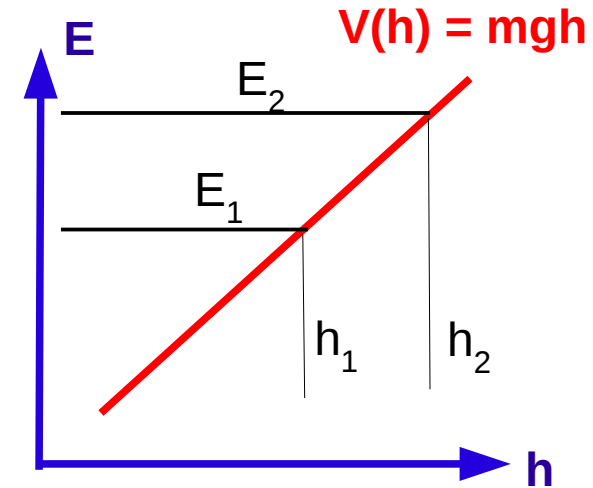
### Energiavesztés

(súrlódás, energiaátadás a környezetnek)

a rendszer lassan eléri az alapállapotot,  
a legkisebb megengedett energiaszintet

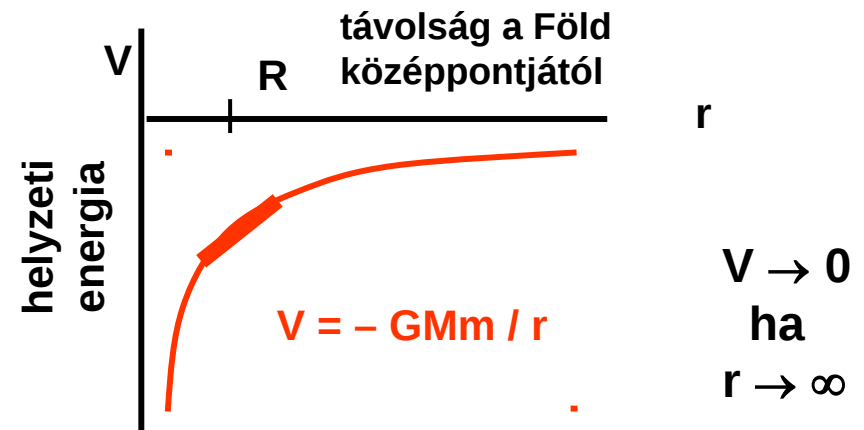
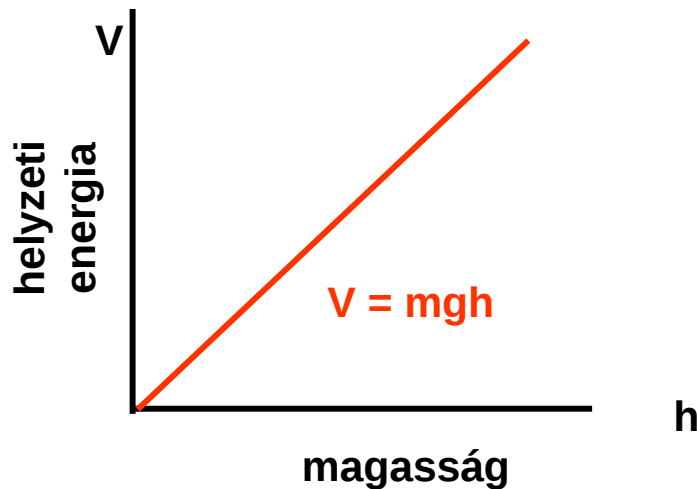
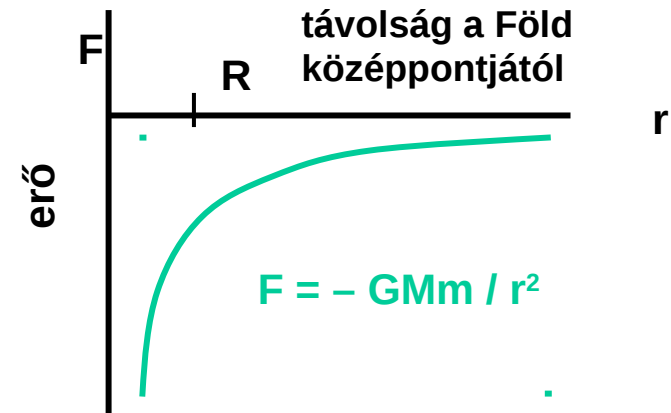
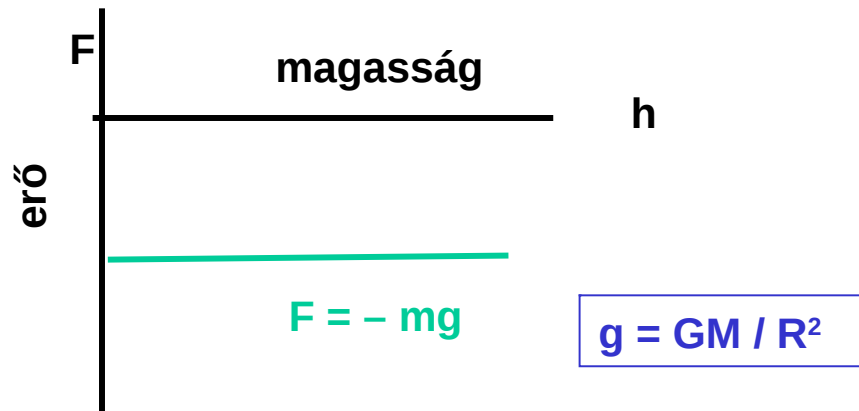


Pattogó labda mozgása:

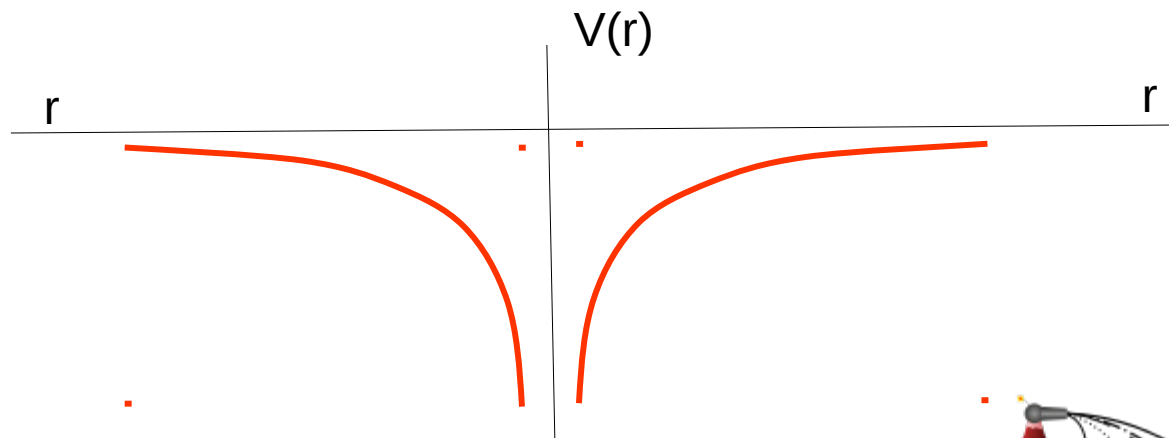


# Gravitációs erő és potenciál

Dobjuk magasabbra: feljebb gyengül a  $g$ , laposabb a potenciálgörbe

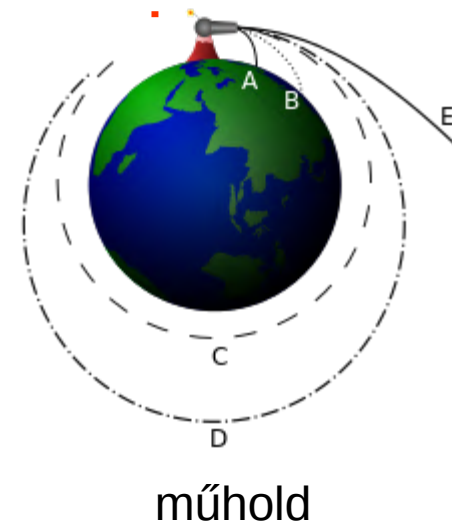


Egy bolygó gravitációs potenciálgödre: a potenciál negatív, a végtelenben nulla

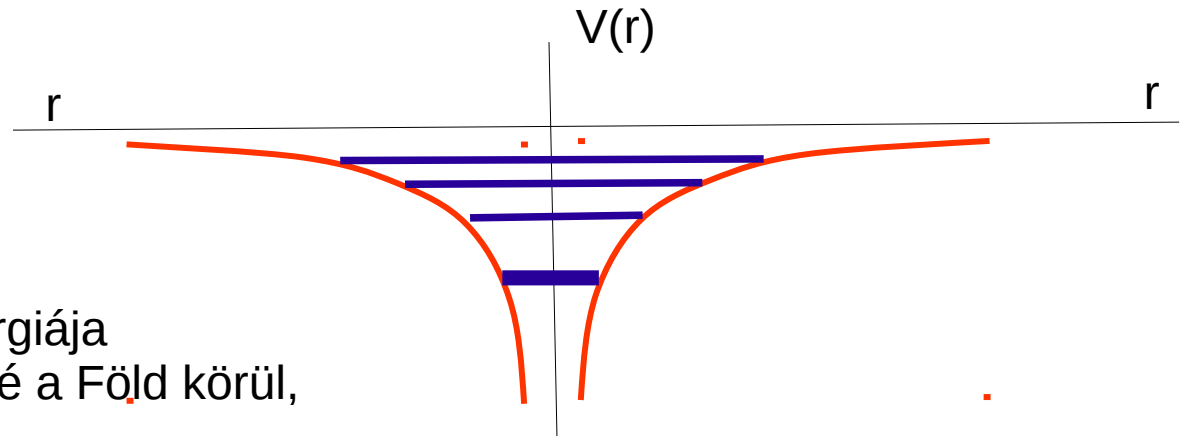


Miért nem esik be a bolygó a centrumba, a végtelen mély gödörbe?

- ott van a Föld  $r > R$
- oldalirányú mozgás, keringés, perdületmegmaradás
- ha a légköri súrlódás fékezi, le is eshet



## Hogy néz ki ugyanez a kvantumelméletben?



A hidrogénatom magjának elektromos terében az elektron potenciális energiája ugyanolyan, mint a műholdé a Föld körül,

**de csak bizonyos megengedett (kvantált) energiaszintek létezhetnek!**

köztük van egy legalacsonyabb energiájú: ez az **alapállapot**

$$E_0 = -me^4/2\hbar^2 \approx -13,6 \text{ eV} = -2,2 * 10^{-18} \text{ J}$$

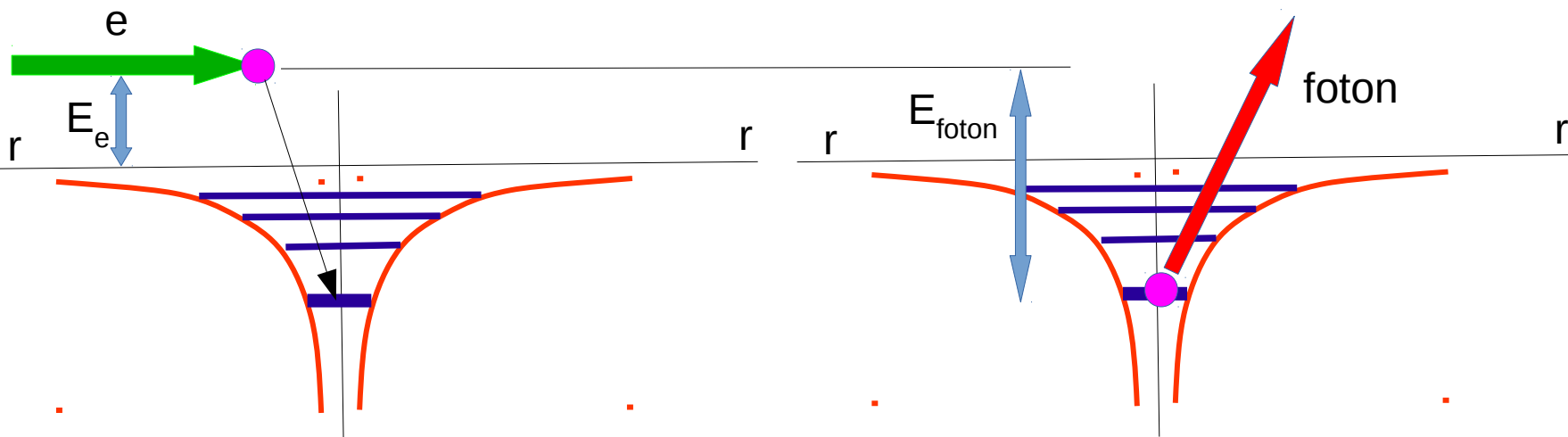
**EZÉRT egyforma minden hidrogénatom: ugyanabban az állapotban vannak!**

Ha kitérítjük, hamar visszatér...



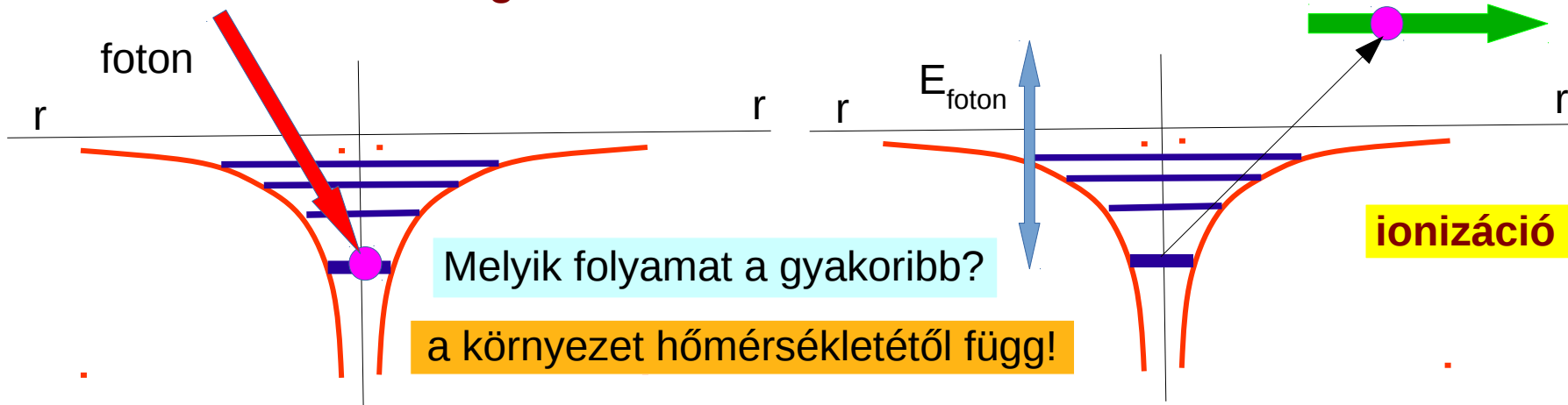
Hogyan kerülhet a szabad elektron a kötött állapotba?

– **energiája egy részének kisugárzásával**



Hogyan szabadulhat ki az elektron a kötött állapotból?

– **külső energiabefektetéssel**



Melyik folyamat a gyakoribb?

a környezet hőmérsékletétől függ!

Ha az átlagos hőmérséklet  $kT > E_0$  (kb 100 ezer K), akkor nincsenek atomok, csak szabad töltött részecskék: ionizált plazma

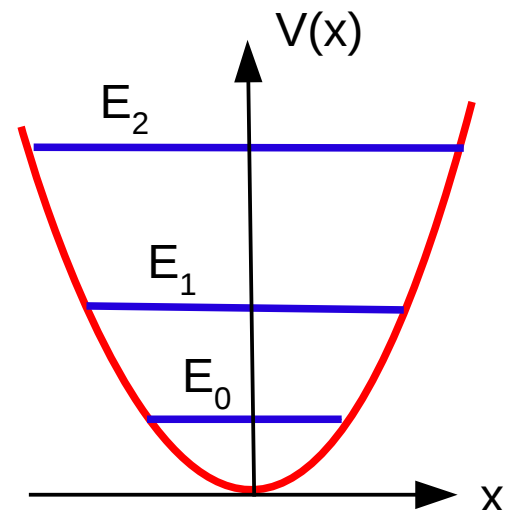


## Végtelen mély potenciálgödör:

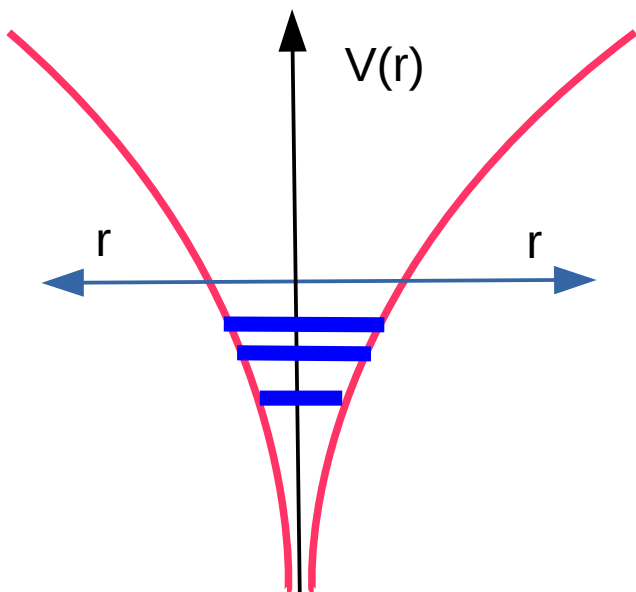
a fizikusok kedvence, a harmonikus oszcillátor

$$F = - Dx \quad V(x) = (1/2) D x^2$$

kvantált energiaszintek:  $E_n = \hbar \omega (n+1/2)$



A valóságban a potenciál nem ilyen: a rugó elszakad...



De van ilyen a valóságban is:  
**a kvarkokat összekötő erő potenciálgödre**

**EZÉRT nem lehet  
a kvarkokat kiszedni a protonból**

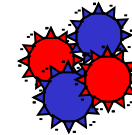
kvark-bezárás (confinement)

Az első bezáródó kompartment tehát a **proton**  
(és rokonai, a neutron meg a többi instabil hadron):  
belül kvarkok, véglegesen bezárva

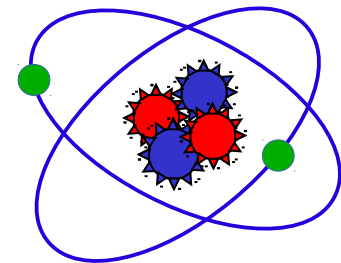


mérete  $\hbar/m_p c \approx 10^{-15}$  m

Második lezáródó struktúra az **atommag**:  
a kvarkok közti kölcsönhatás maradéka  
köti össze



A következő struktúra az **atom**:  
elektromos vonzóerő a mag és az elektron között



A következő struktúra az **atom**:  
elektromos vonzóerő  
a mag és az elektron között

**De ez 100 ezerszer ( $10^5$ ) nagyobb az atommagnál!**  
Az atom lényegében üres!

(mintha a Föld Holdja kb a Szaturnusz távolságában lenne)

Miért nem megy közelebb az elektron a maghoz?

Heisenberg-féle határozatlansági reláció:

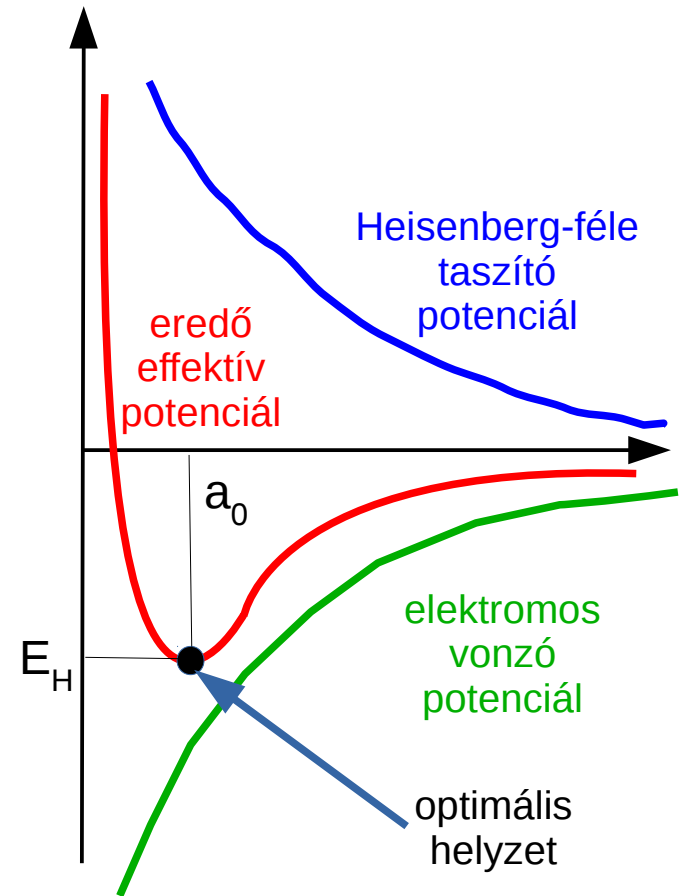
$$\Delta x \Delta p > \hbar$$

Ha az elektront összenyomjuk,  
energiát kell befektetni

$$\Delta E > \hbar^2 / (2m \Delta x^2)$$

Az effektív potenciál mélypontja  
adja az atom méretét:

$$a_0 \approx \hbar^2 / (m_e e^2) \approx 10^{-10} \text{ m}$$



## Új szervezési elv: maradék- avagy másodlagos kölcsönhatás

**lezárt kompartmentek** – ez jellegzetes **kvantummechanikai** jelenség!

a klasszikus fizikában ilyesmi nem fordul elő!

a Naprendszer mindig be tudna fogadni egy újabb bolygót

egy atom legfeljebb egy vagy két plusz elektront tud befogadni,  
és csak gyengén köti meg őket

ezért a lezárt kvantumrendszerek kifelé nem túl aktívak!

mint zárt, **látszólag belső struktúra nélküli egységek** viselkednek

ezen alapul a kompartmentek hierarchiája



# Új szervezési elv: maradék- avagy másodlagos kölcsönhatás

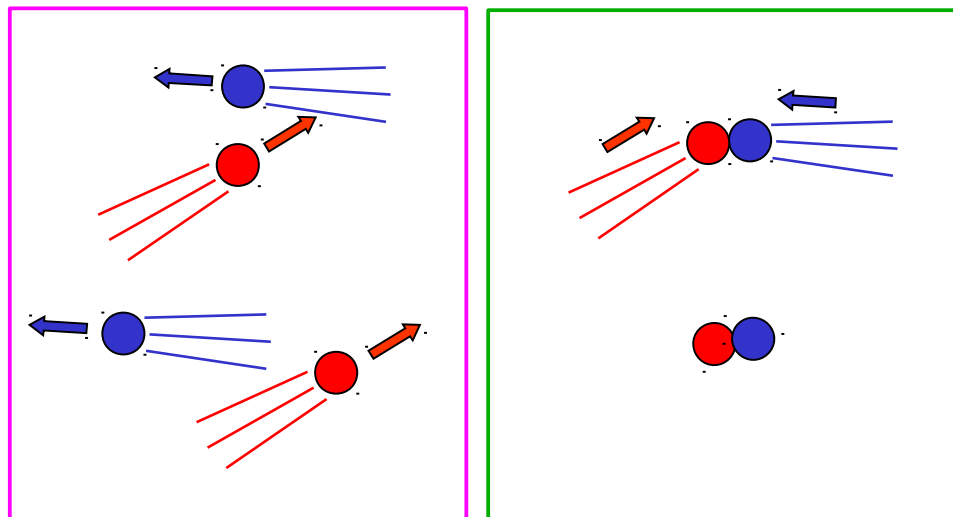
a lezárt kompartmentek egymástól távol  
nem érzik egymás hatását

de közel érve beleszimatolnak  
egymás belső terébe,  
és megzavarják azt

**indukált kölcsönhatás**

kötött állapot

„bogáncofizika”



ez **sokkal gyengébb** kötés, (egy molekulát már szobahőmérsékleten fel lehet bontani)

de leírása matematikailag sokkal bonyolultabb, mint az elemi összetartó erőé!  
Ezért olyan nehéz és bonyolult

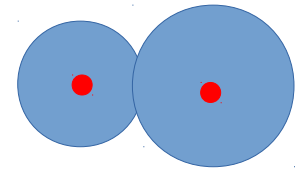
**a magfizika**  
**és a kémia**

a nukleonok (p és n) közti másodlagos kölcsönhatás  
az atomok másodlagos kölcsönhatása  
(vegyérték, elektronegativitás, kovalens kötés...)



A következő szint: atomok vagy molekulák aggregátuma  
azaz **a szilárd (és folyékony) anyag**

**összetartó erők:** itt is a maradék-kölcsönhatás, de már harmadlagos  
ezek összehúzzák a részecskéket



Meddig? Amíg az elektronfelhők egymásba nem hatolnak!

**Új játékos: a Pauli-elv**

**két fermion** (feles spinű részecske, pl az elektron)  
nem lehet azonos állapotban,  
speciel **nem lehet ugyanott**

**Ezért nem esünk át a padlón!**

A Pauli-elven alapul

- az atomi elektronhéj szerkezete
- az egész kémia
- a szilárdtest-fizika



## Szilárdtestek szerkezete

elektromos vonzóerő, Pauli ellenáll  
itt is kialakul egy effektív potenciál

az atomok optimális távolsága

$$d_s \approx a_0 \approx \hbar^2 / (m_e e^2) \approx 10^{-10} \text{ m}$$

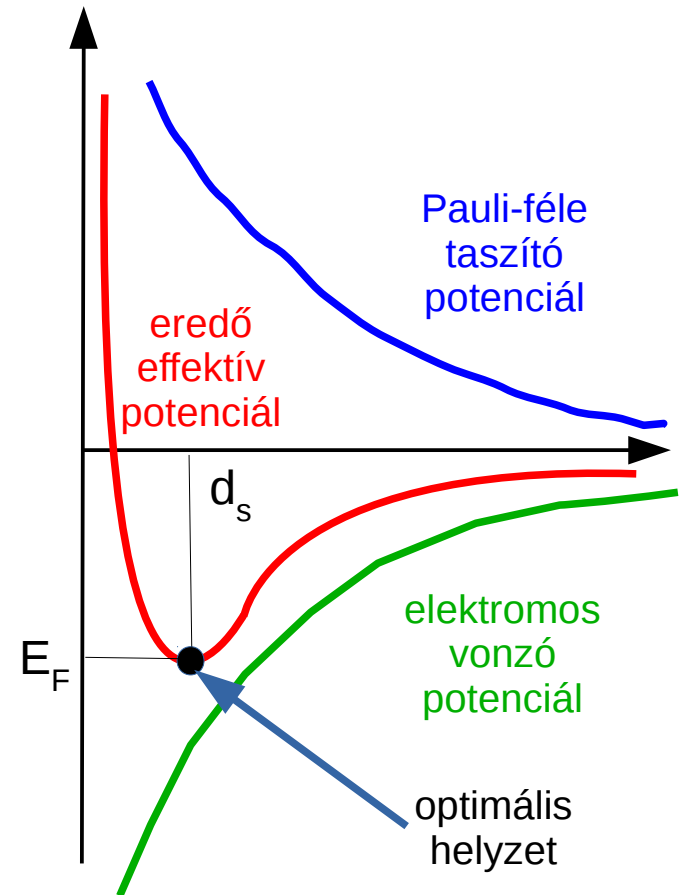
kb. megegyezik az atomok méretével:  
az atomok összeérnek!

**Mekkora lesz az anyag sűrűsége?**

Egy atom (tömege néhány protonnyi) egy  $a_0$  méretű gömbben

$$\rho = m_p / a_0^3 = 10^{-27} \text{ kg} / (10^{-10} \text{ m})^3 = 10^3 \text{ kg/m}^3 = \text{a víz sűrűsége!}$$

**Így lehet elemi atomfizikai állandók alapján megsaccolni a közönséges makroszkópikus anyag tulajdonságait!**

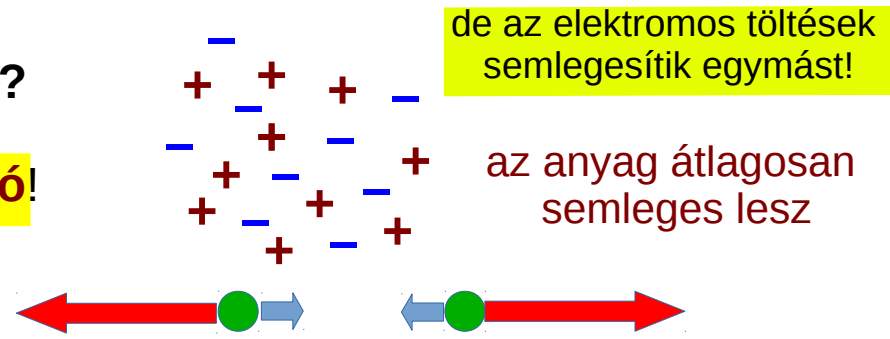




## Meddig működik ez a szilárdtest-fizika?

Amíg közbeszól egy új hatás, **a gravitáció!**

A gravitáció nagyon gyenge erő:

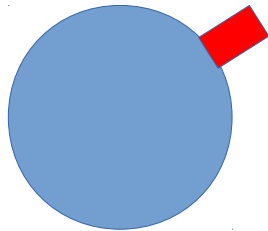


két elektron közt

## De sok lúd disznót gravitál!

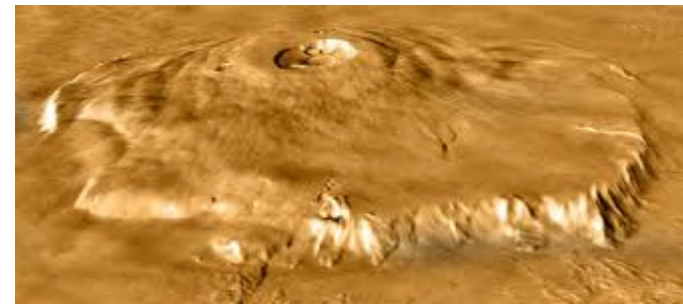
Kozmikus méretekben már a gravitáció dominál.

Egy bolygón álló hegy alján a súly miatti nyomás már akkora, hogy az anyag megfolyik



$$\Delta E \approx 0,1 \text{ eV} \quad H_{\max} \approx 50 \text{ km}$$

És valóban, a Naprendszer legmagasabb hegye a Marson 25 km magas



Olympus Mons

## A Pauli-elv további trükkjei

A bolygók belsejében a gravitáció és a Pauli-elv harcol egymással.

**A szokásos atommérettel ( $10^{-10}$  m) ez nem megy!**

Az atomok összenyomódnak, **degenerálódnak**, így a Pauli-nyomás megnő, és ellenáll a gravitációnak.

Milyen állapot van a Föld belsejében? A részleteket még ma is csak találgatjuk...

**Ennek a játéknak a végső fokozata:**

csillagméretű testek, **kihűlt csillagok** húzódnak össze Föld-méretre  
ezek a **fehér törpék**

az atomok századrésznyire mennek össze, a sűrűség **egymilliószeresre** nő

**Lehet ezt még fokozni?**

Nagyobb csillagban a még nagyobb gravitáció, még nagyobb nyomás hatására az elektronok „belepréselődnek” a protonokba – neutronok jönnek létre.

A neutronok összeérnek. Mint egy nagy atommag.  
A méret  $10^5$ -szörösen csökken, a sűrűség  $10^{15}$ -szörösre nő!

**ez a neutroncsillag**

**mérete 10 km**



Nagyobb struktúrák létrejötténél belép egy új paraméter: **a hőmérséklet**

**Gázfelhők:** a gravitáció összehúzza, munkát végez. **A felhő felmelegszik.**

A hőenergia fele kisugárzódik,  
a másik fele bent marad.

A forró gázgömb infravörösen világít.  
Ha így marad, ez lesz a **barna törpe.**

Ez csak átmenetileg létezik, végül kihűl...

De ha a gázfelhő elég nagy tömegű,  
a belseje olyan meleg lesz,  
hogy beindul egy új folyamat:

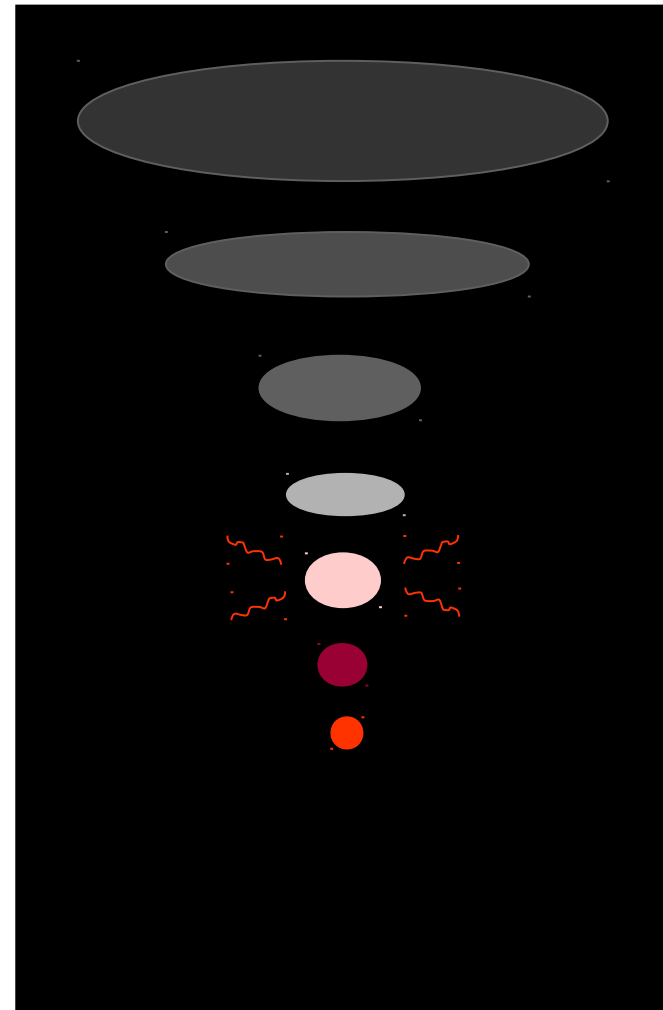
Részletek:

dgy:

A csillagok termodinamikája 1.

**A lehűléstől forró sodó téglá**

Atomcsill 2012. 01. 19.



Nagyobb struktúrák létrejötténél belép egy új paraméter: **a hőmérséklet**

**Gázfelhők:** a gravitáció összehúzza, munkát végez. **A felhő felmelegszik.**

A hőenergia fele kisugárzódik, a másik fele bent marad.

A forró gázgömb infravörösen világít. Ha így marad, ez lesz a **barna törpe.**

Ez csak átmenetileg létezik, végül kihűl...

De ha a gázfelhő elég nagy tömegű, a belseje olyan meleg lesz, hogy beindul egy új folyamat:

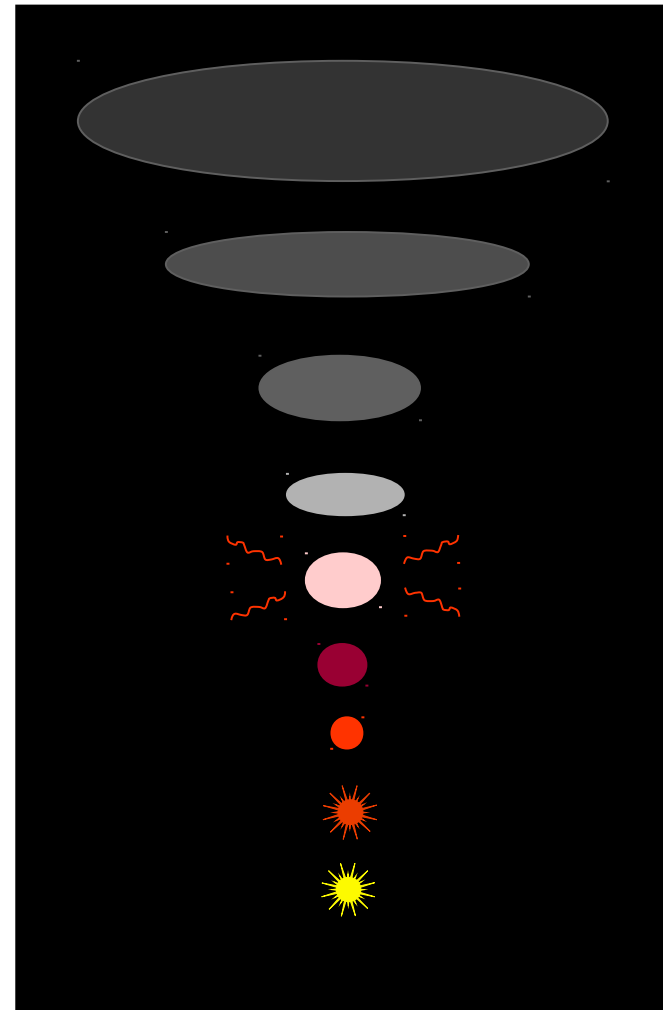
**atommagok egyesülése, fúziója**

ez energiatermelő folyamat

ehhez kell egy minimális tömeg:

$$M = m_p N \quad N = (\hbar c / G m_p^2)^{3/2} = 10^{57}$$

(a túl nehéz, túl meleg csillag hamar felrobban)

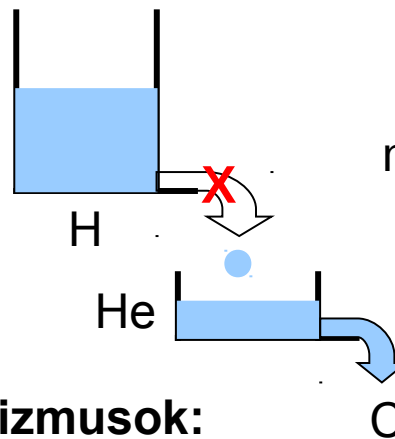


**Megszületett a csillag**



## Csillag:

tartósan fennmaradó  
önszabályozó  
energiatermelő rendszer

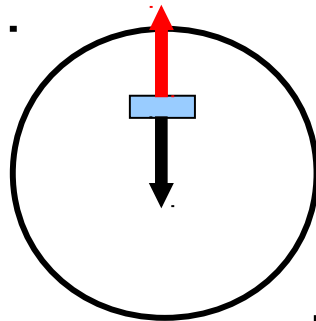


üzemanyag-adagolás  
nukleáris biztonsági szeleppel

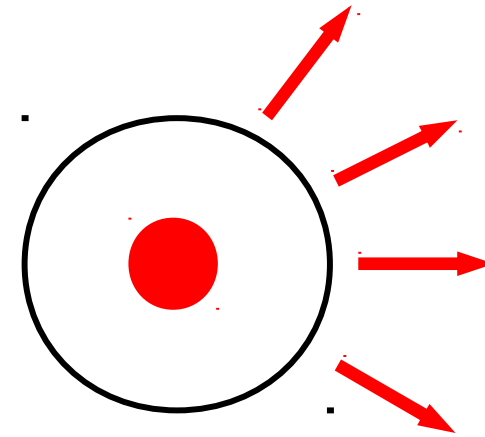
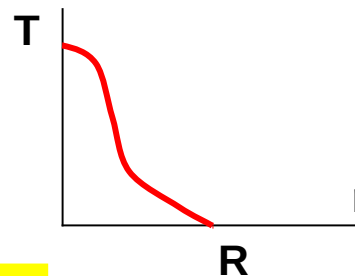
önszabályozási mechanizmusok:

mechanikai, hidrosztatikai:

sugár-  
+ hidrosztatikai nyomás  
gravitáció



termikus,  
hővezetési,  
energetikai:



a csillag egy negatív visszacsatolású,  
önszabályozó nukleáris kazán

mechanikai, termikus és sugárzási egyensúlyban  
(stacionárius állapotban)

Működhet simán vagy pulzálva: változócsillagok.

Részletek:

dgy:

A csillagok termodinamikája 2.

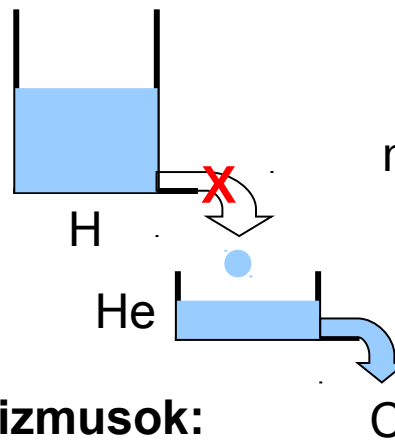
**Hamuval fűteni**

Atomcsill 2013. 01. 10.



## Csillag:

tartósan fennmaradó  
önszabályozó  
energiatermelő rendszer

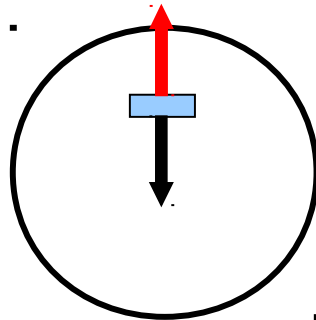


üzemanyag-adagolás  
nukleáris biztonsági szeleppel

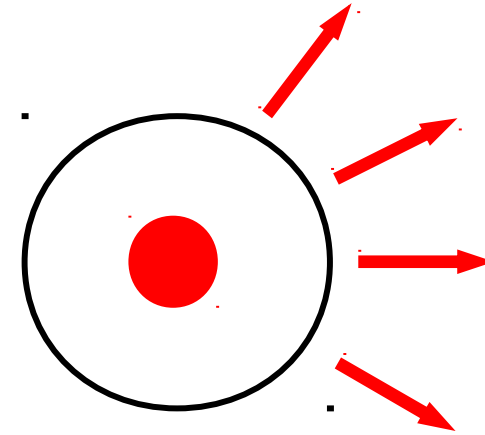
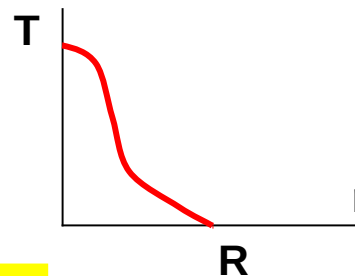
önszabályozási mechanizmusok:

mechanikai, hidrosztatikai:

sugár-  
+ hidrosztatikai nyomás  
gravitáció



termikus,  
hővezetési,  
energetikai:



ami befolyik,  
az rögtön kifolyik  
(rögtön: 1 millió év)

a csillag egy negatív visszacsatolású,  
önszabályozó nukleáris kazán

mechanikai, termikus és sugárzási egyensúlyban  
(stacionárius állapotban)

Működhet simán vagy pulzálva: változócsillagok.

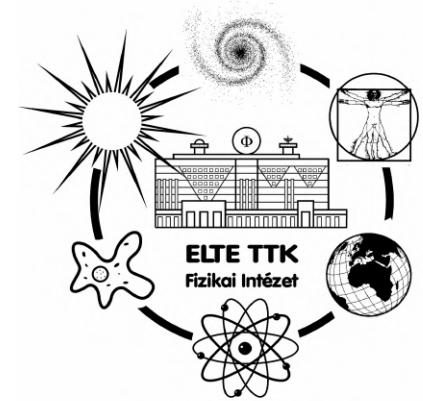
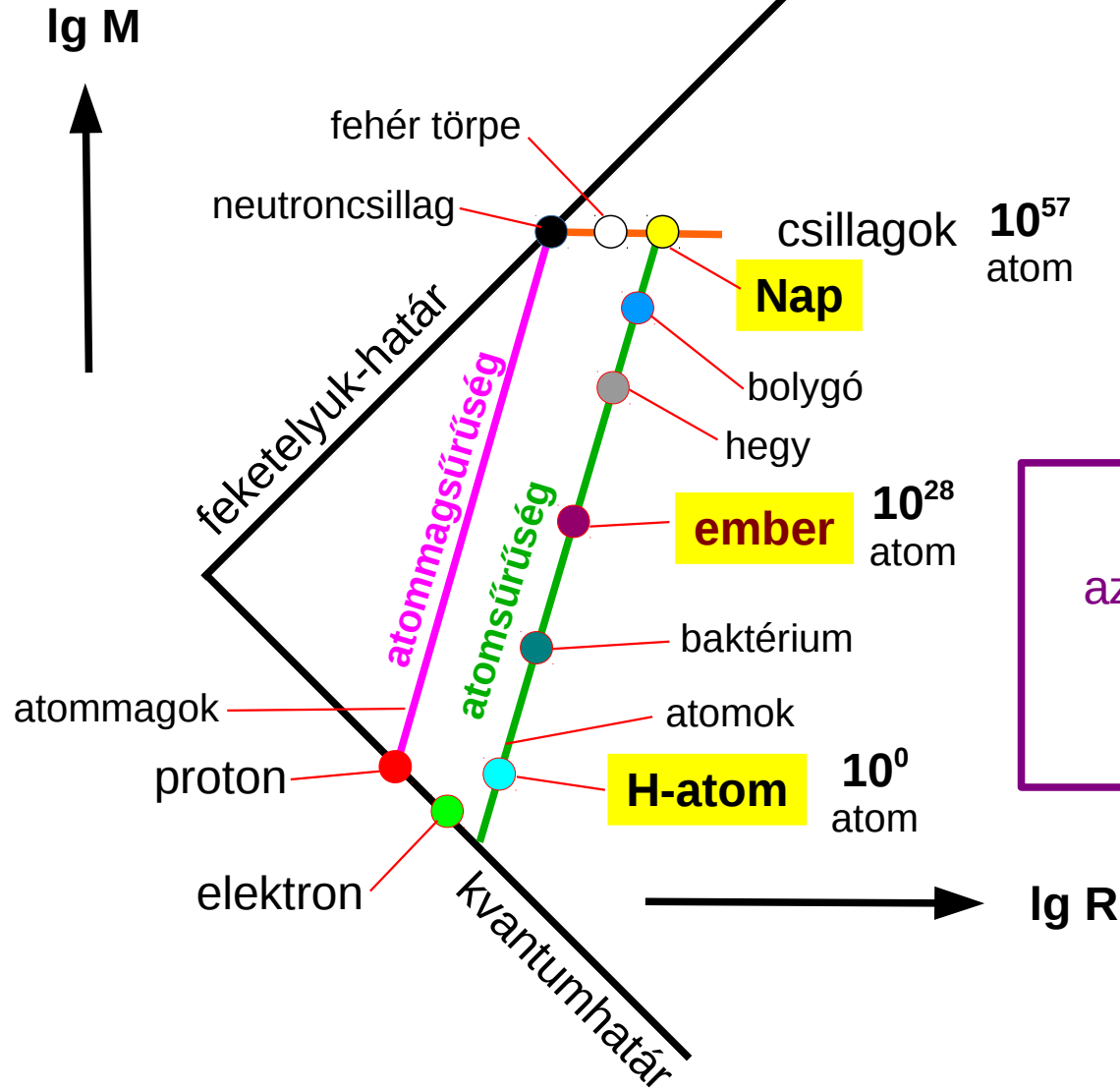
Meddig?

amíg el nem fogy  
a hidrogén...

a centrális hőmérséklettől  
(azaz a tömegtől) függően  
10 millió – 1000 milliárd év



# Az Univerzum térbeli struktúrái

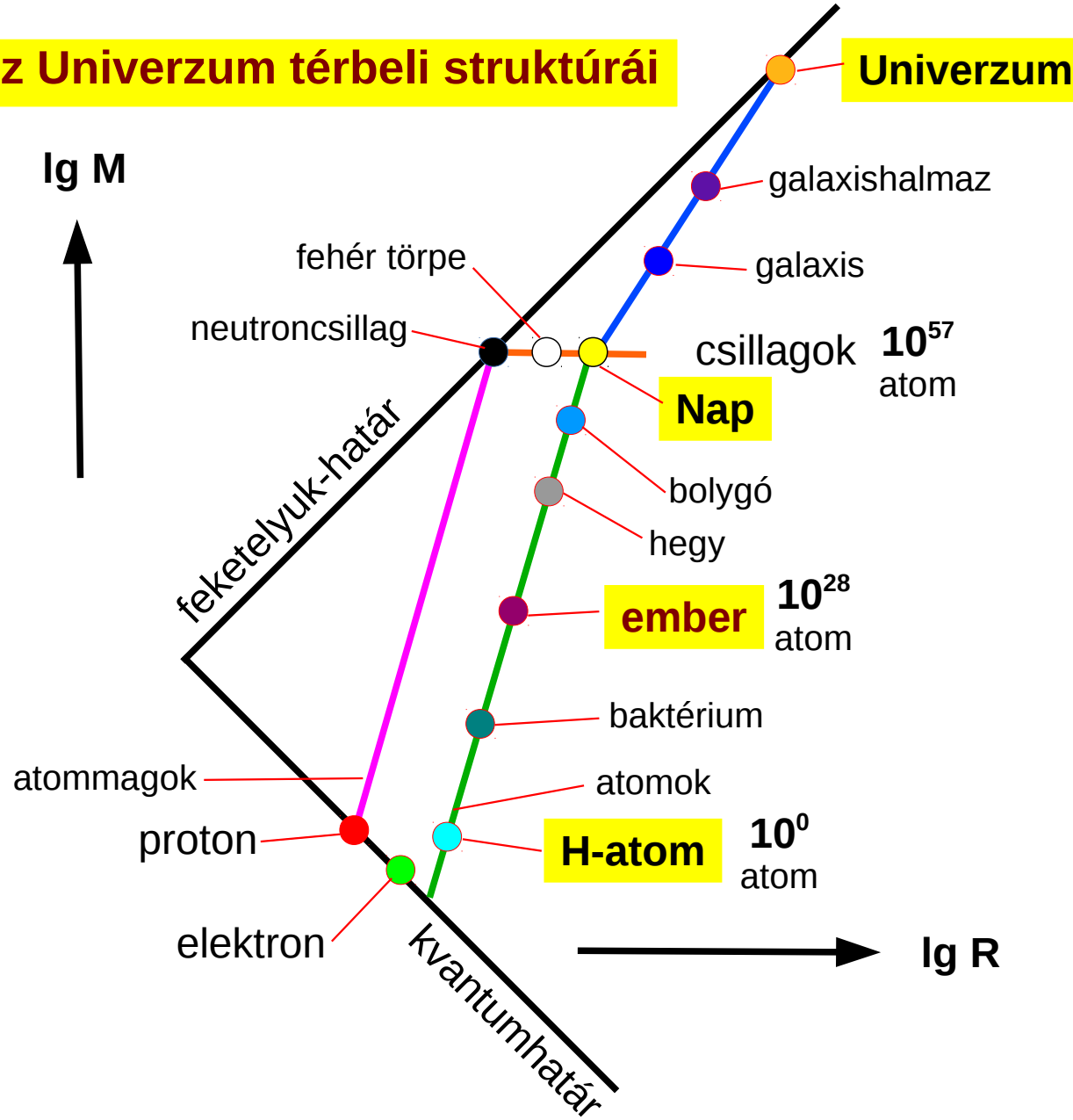


Az atomoktól  
a csillagokig

Félúton  
az atom és a csillag között  
az ember  
a világ közepe!



# Az Univerzum térbeli struktúrái



Még nagyobb struktúrák:  
atomokat már nem lehet  
egymás mellé pakolni!

Hígítsuk fel vákuummal:  
**csillagrendszerek**

gömbhalmazok  
galaxisok  
galaxishalmazok

A diagram e szakaszának  
meredeksége már nem 3,  
hanem kb 1,2

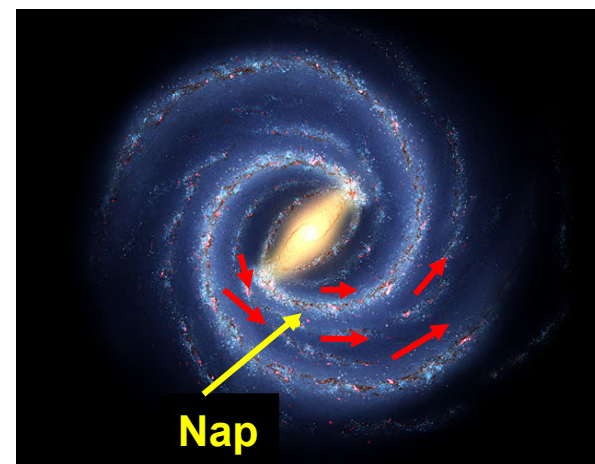
**az Univerzum  
makroszerkezete  
fraktál**





## Csillaghalmaz, csillagváros: galaxis

Stabil struktúra, stacionárius egyensúlyban

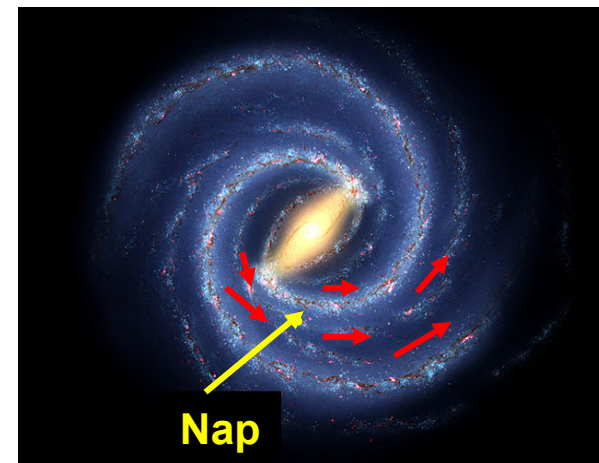


Részletek:  
Frei Zsolt:  
**Az Univerzum  
szerkezete**  
Atomcsill 2005. 12. 15.



# Csillaghalmaz, csillagváros: galaxis

Stabil struktúra, stacionárius egyensúlyban



## Csillaghalmaz, csillagváros: galaxis

Stabil struktúra, stacionárius egyensúlyban

természetes hipotézis:  
akárcsak a bolygórendszerénél

összehúzza a gravitáció

ellentart a keringés centrifugális ereje

De ez nem így van: nincs elég anyag a galaxisban,  
hogy a szükséges gravitációs vonzóerőt kifejtse!

Kell valami más: ez **a sötét anyag**.

Nem tudjuk, mi az, de biztosan létezik.  
Már le is fényképeztük!

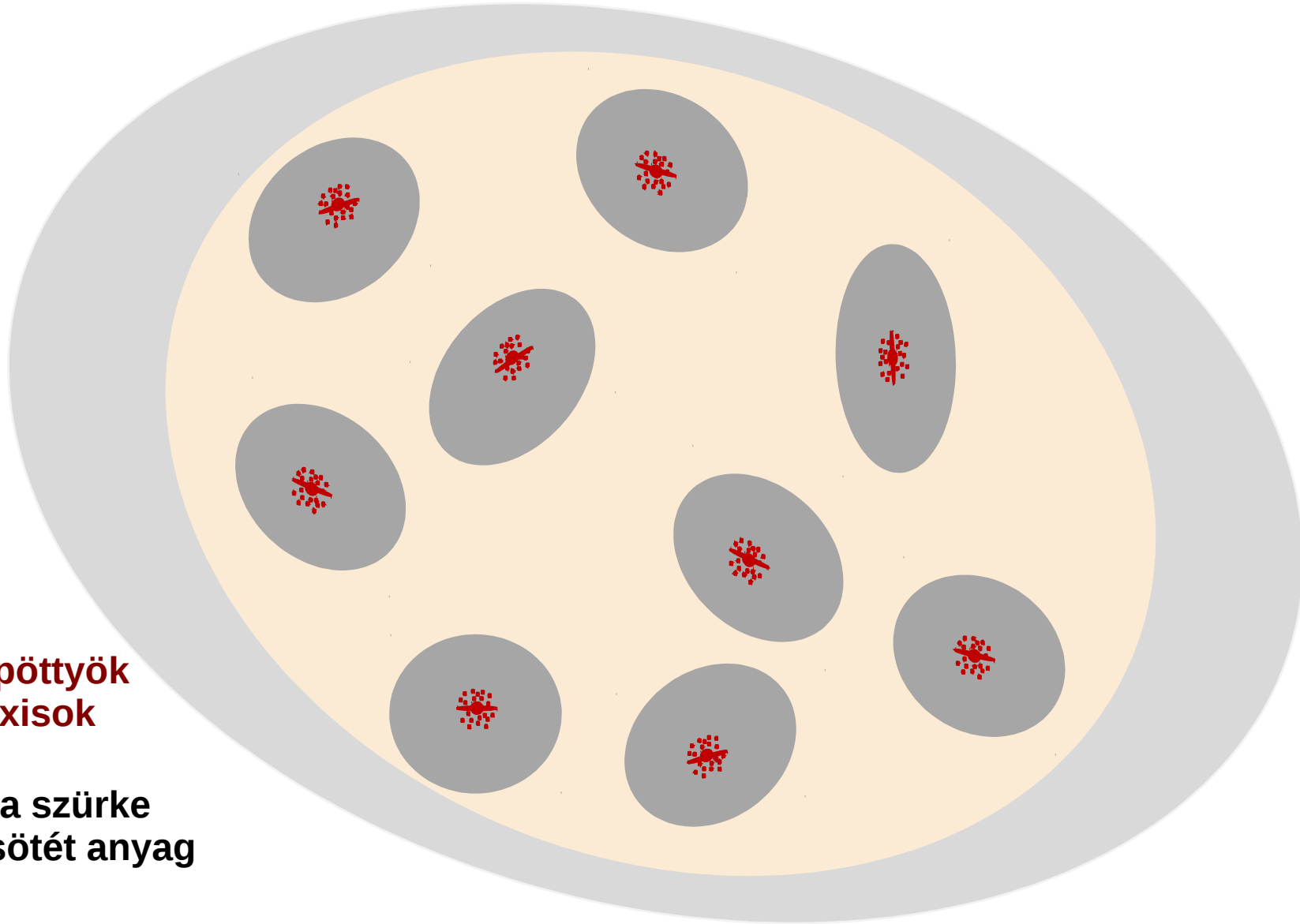
Részletek:

dgy:

**A sötét anyag nyomában**

Atomcsill 2016. 09. 08.





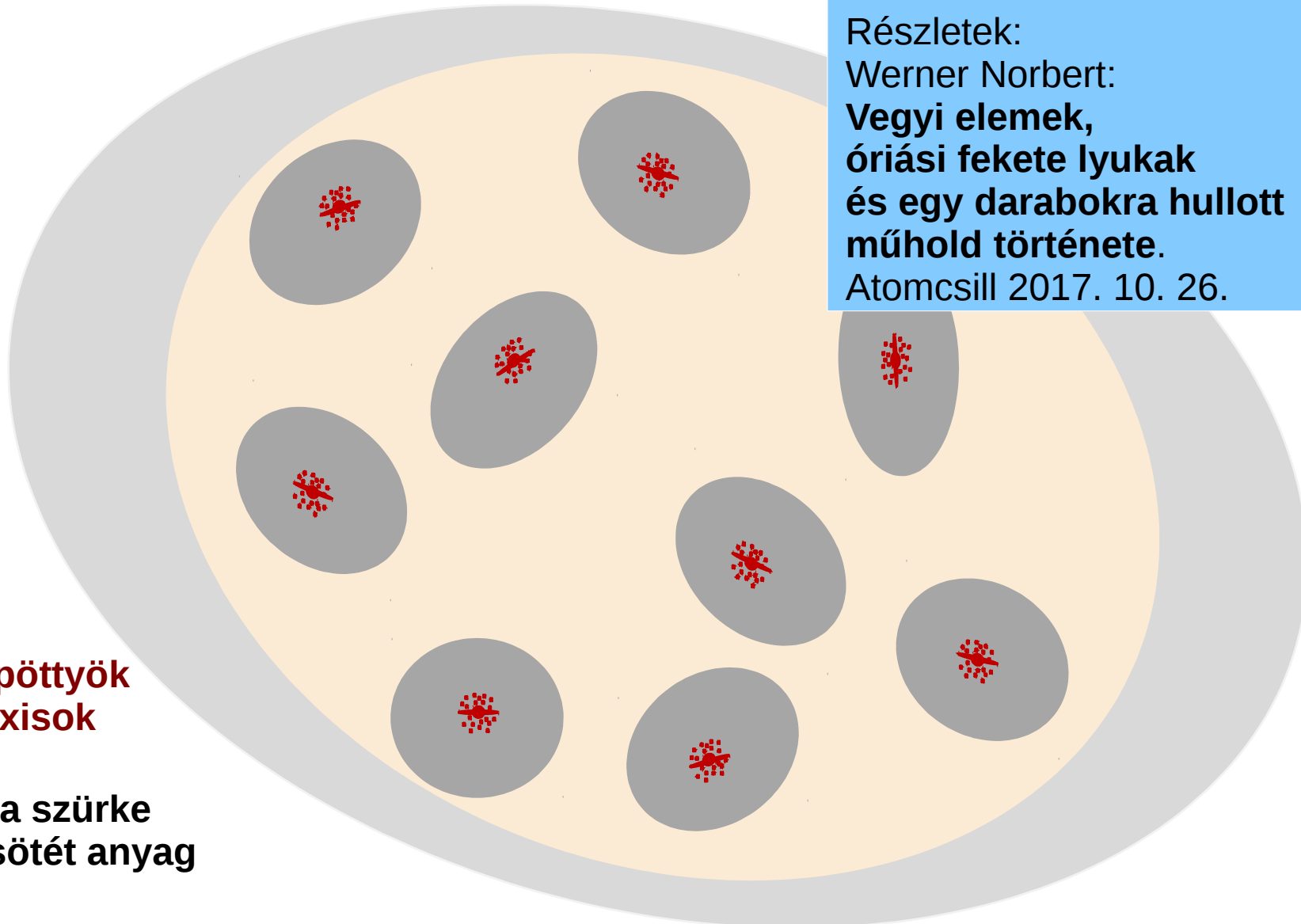
a piros pöttyök  
a galaxisok

a szürke  
a sötét anyag

## Galaxis-szuperhalmaz szerkezete

a sárga: forró hidrogén

Részletek:  
Werner Norbert:  
**Vegy elemek,  
óriási fekete lyukak  
és egy darabokra hullott  
műhold története.**  
Atomcsill 2017. 10. 26.

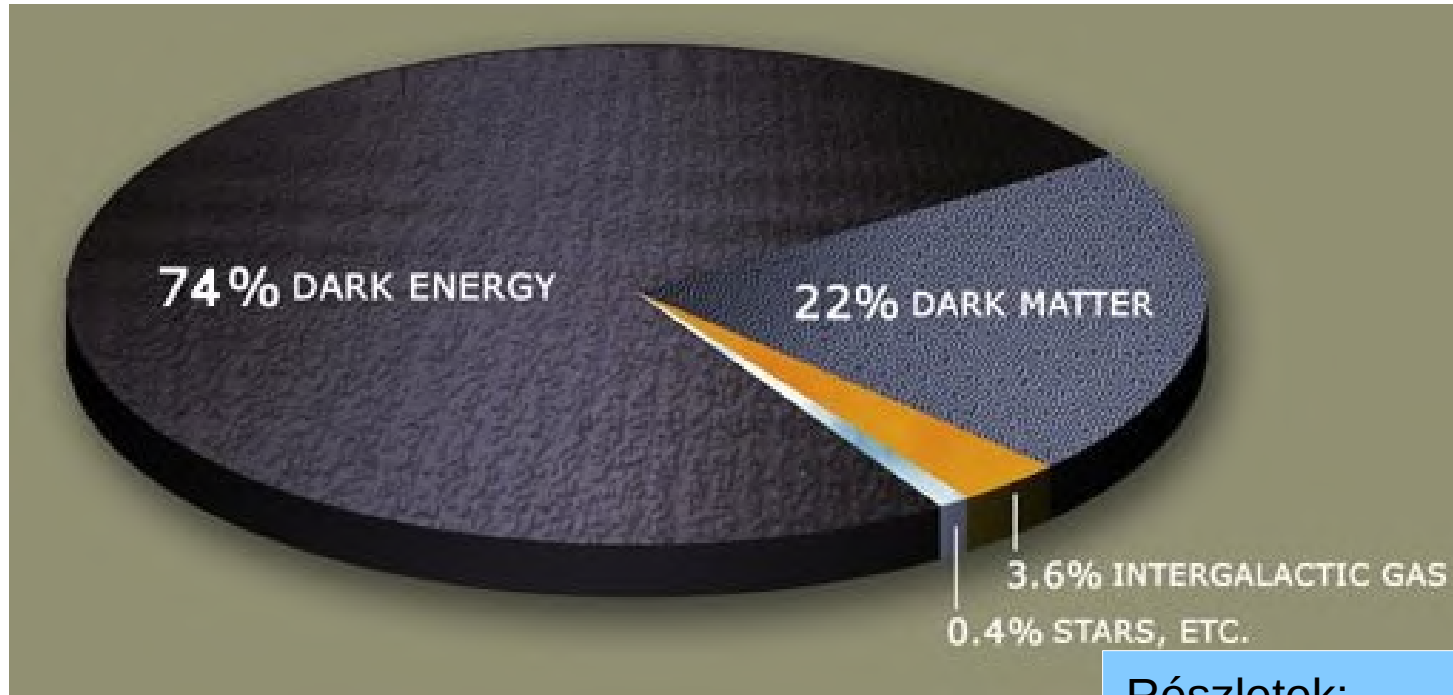


a piros pöttyök  
a galaxisok

a szürke  
a sötét anyag



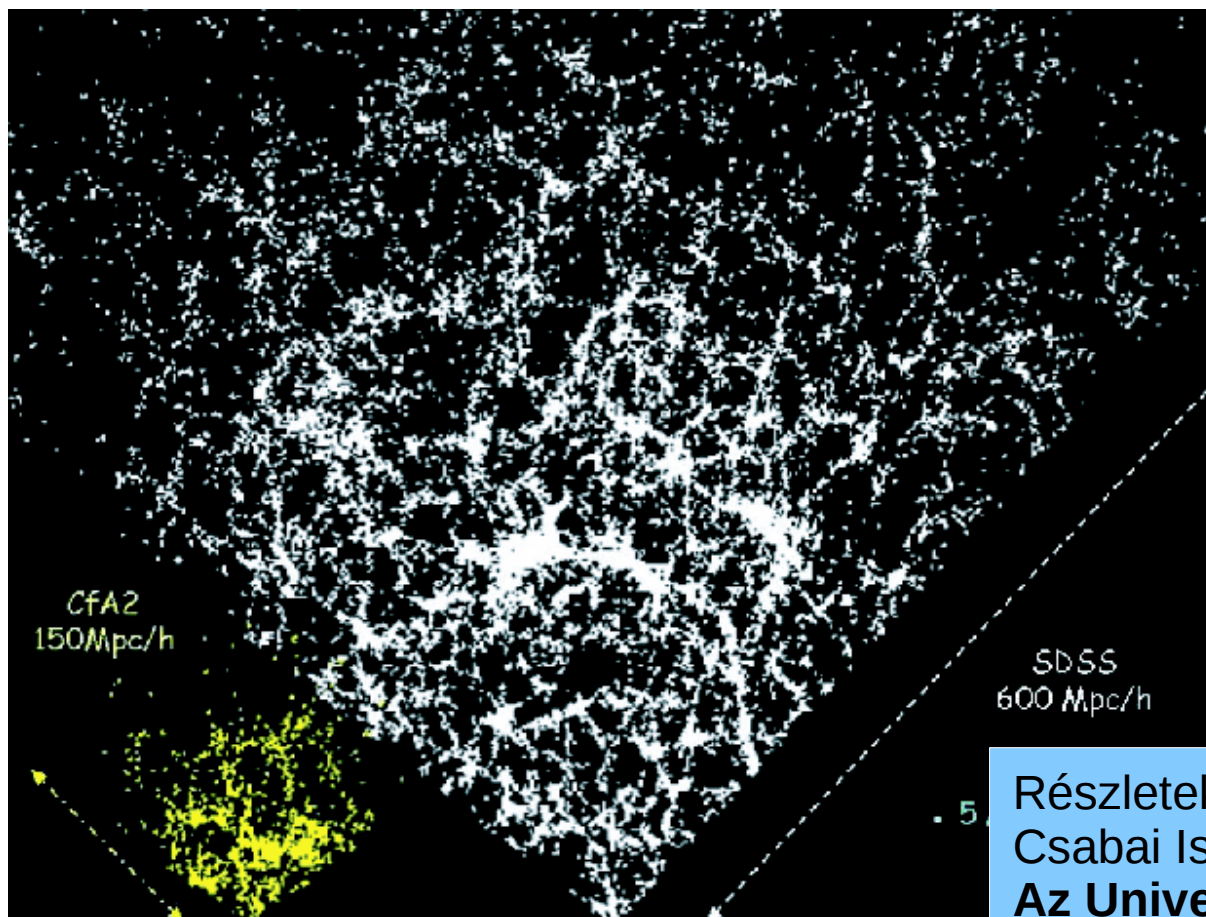
# Az Univerzum anyagi összetétele



Részletek:  
dgy:  
**Az Univerzum  
anyagai**  
Atomcsill 2010. 09. 30.



# A legnagyobb struktúra: a galaxishalmazok szálás szerkezete

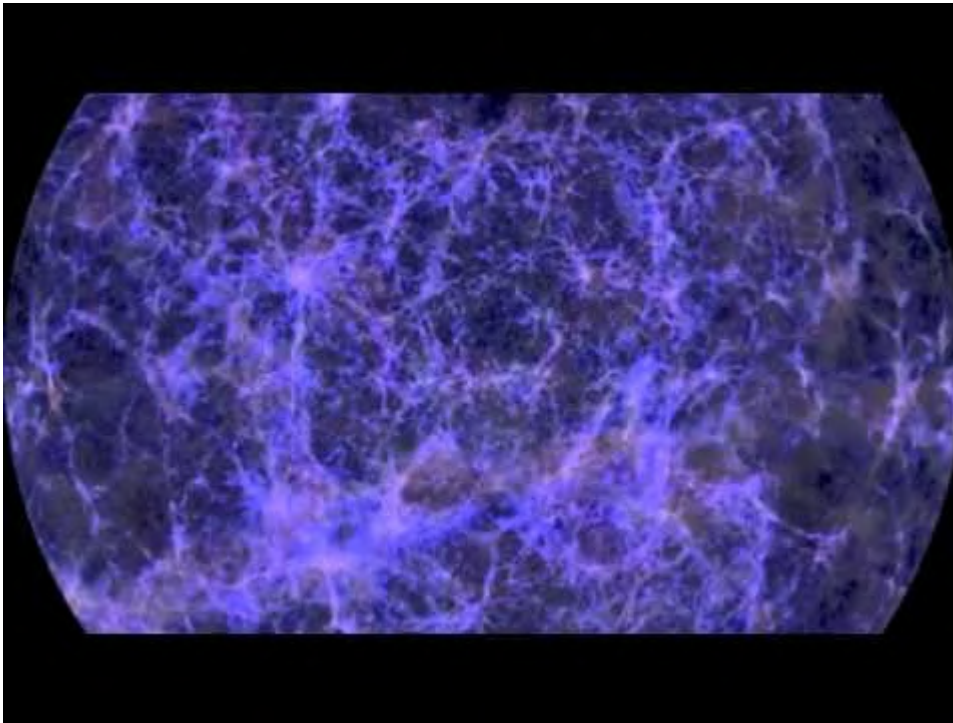


köztük a világ legnagyobb lyukjai

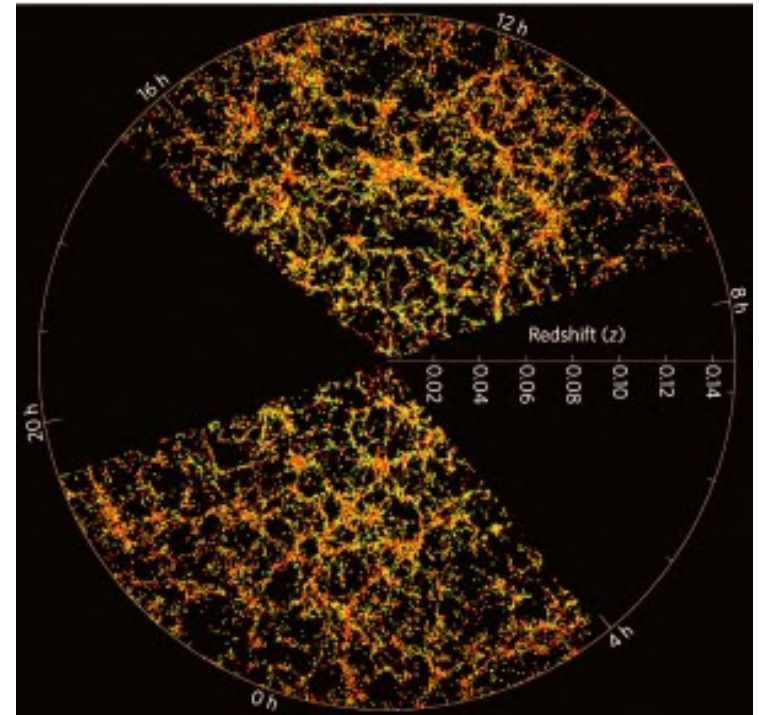
Részletek:  
Csabai István:  
Az Univerzum  
3 dimenziós térképe  
Atomcsill 2015. 11. 19.



A mai elmélet szerint a szálak struktúrát a **sötét anyag** alakítja ki!



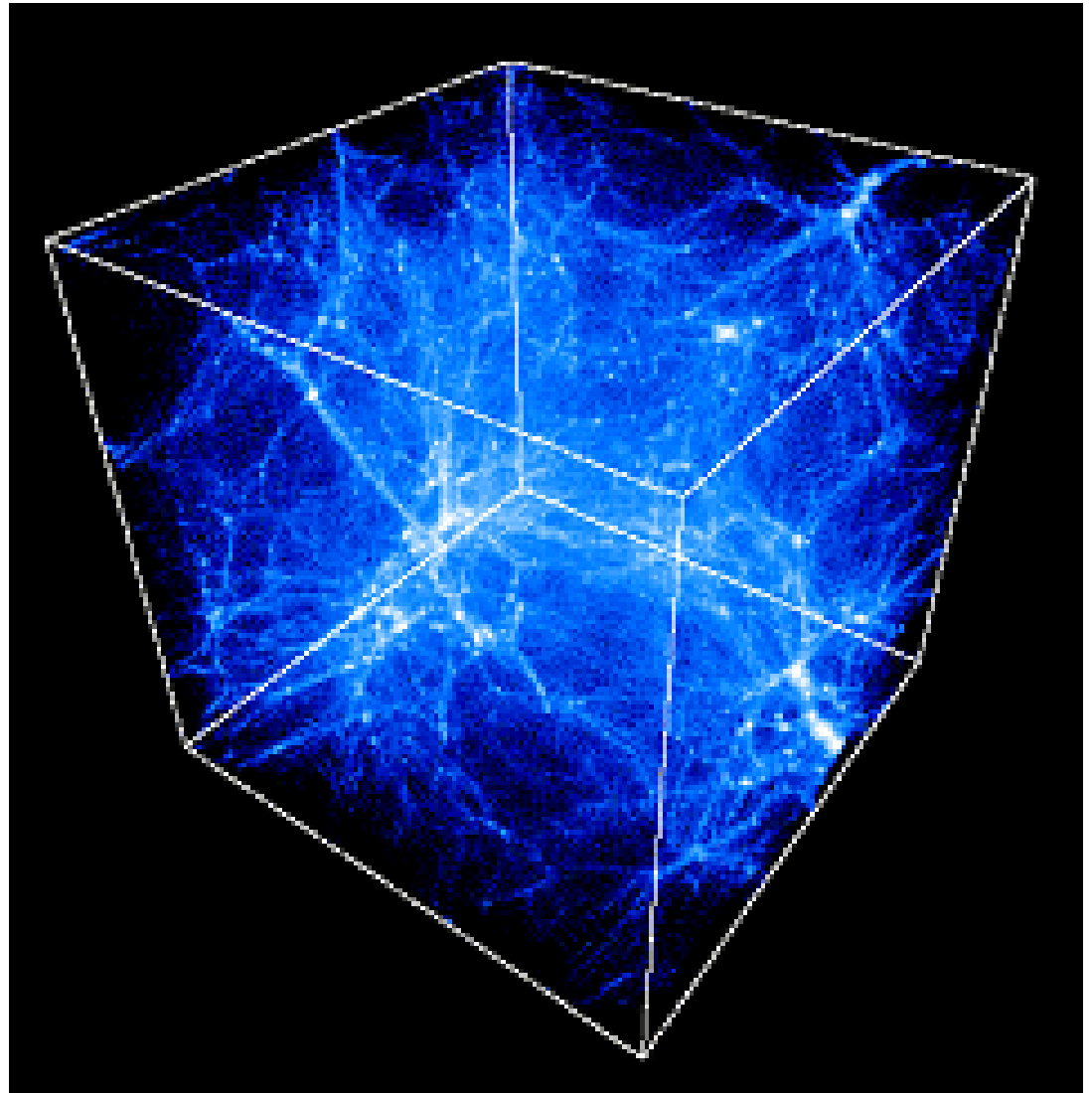
a sötét anyag elmélete alapján  
modellezett szerkezet



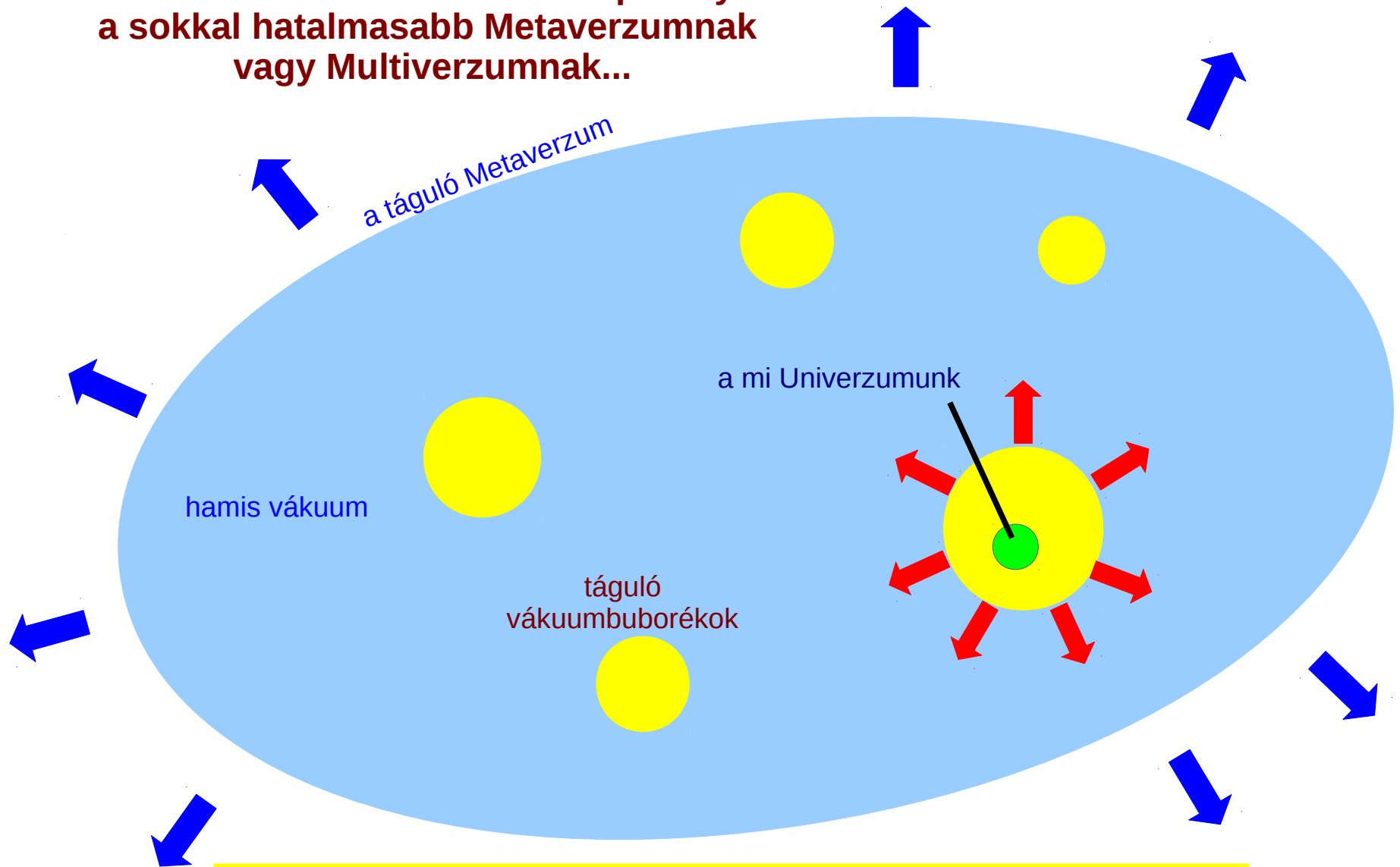
az SDSS által feltérképezett  
szerkezet



## A szálak struktúra kialakulásának modellezése



De hátha a mi Univerzumunk csak parányi része  
a sokkal hatalmasabb Metaverzumnak  
vagy Multiverzumnak...



Vajon milyen erők tartják össze a Metaverzum struktúráit?



**MOST JÖNNEK AZ IDŐBELI STRUKTÚRÁK...**

**IDŐVEL...**

**FOLYTATÁSA KÖVETKEZIK**





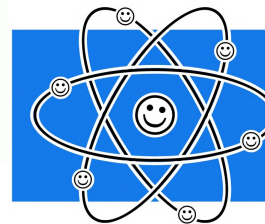
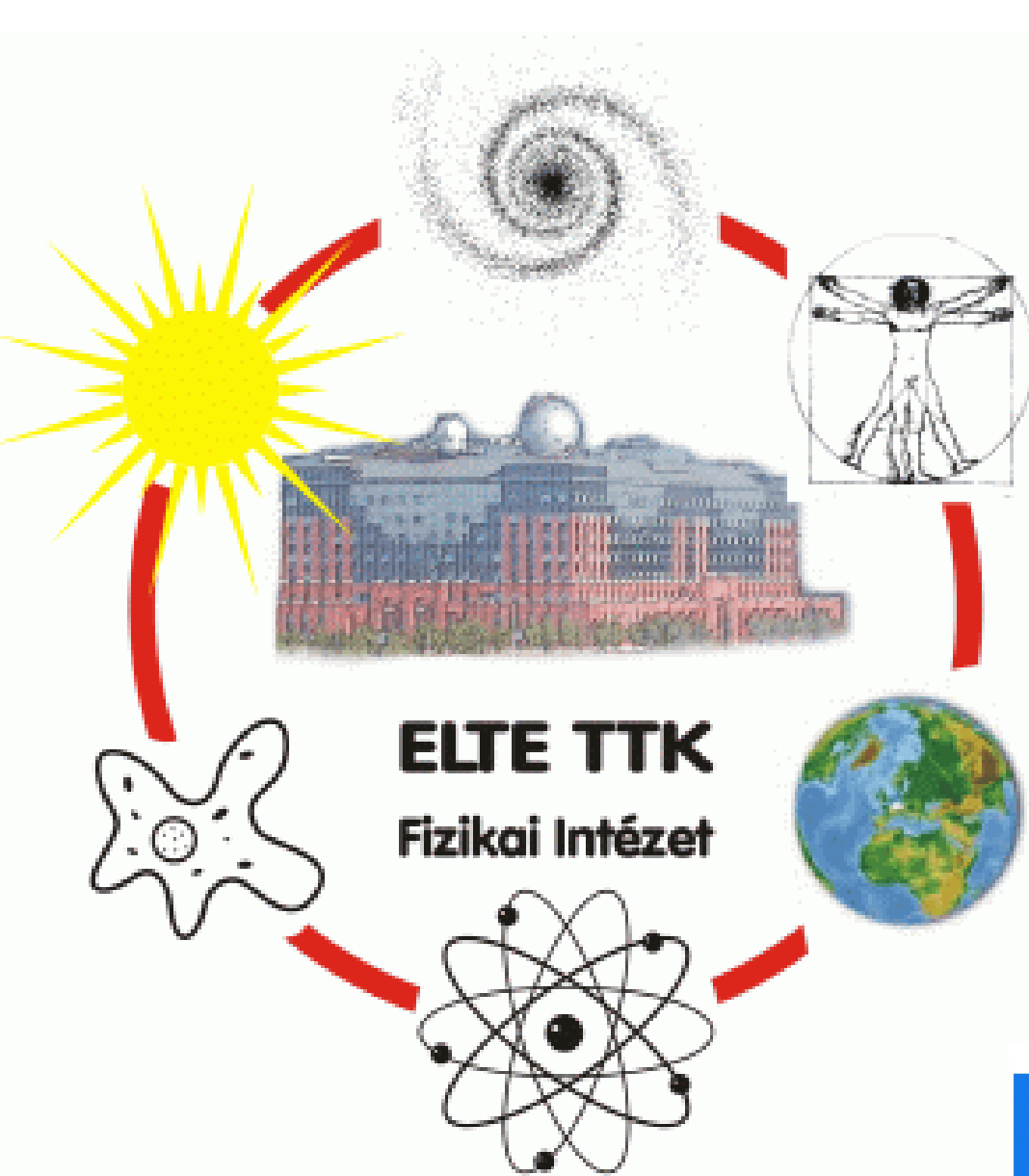
# KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!



# Az atomoktól a csillagokig

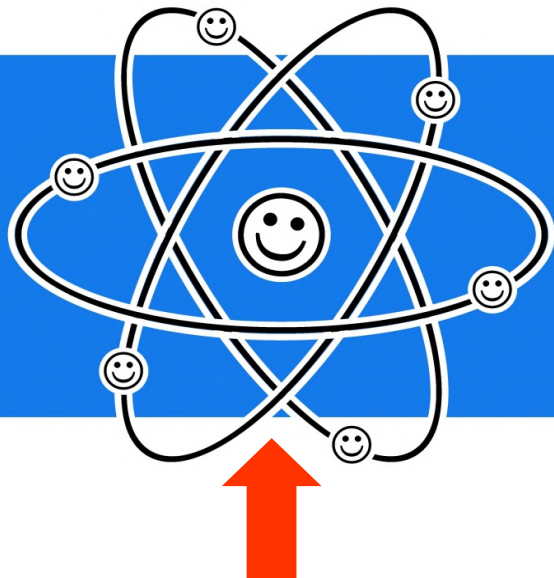
# 200.

**ELTE TTK**  
Fizikai Intézet



A fizika mindenkié





# A fizika mindenké

## BONUSKÉRDÉS

Az ábrán az Élethez nélkülözhetetlen,  
az Univerzumban Mindenütt  
megtalálható **struktúra**, a  
 **$^{12}\text{C}$**   
atom látható

**Kérdés:** **Hány elemi fermionból  
(kvarkból és elektronból)  
áll a  $^{12}\text{C}$  atom?**



