

# Neutroncsillagok:

„Fenomenális kozmikus erő  
– egy icipici kis helyen”



Pósfay Péter  
ELTE, Wigner FK



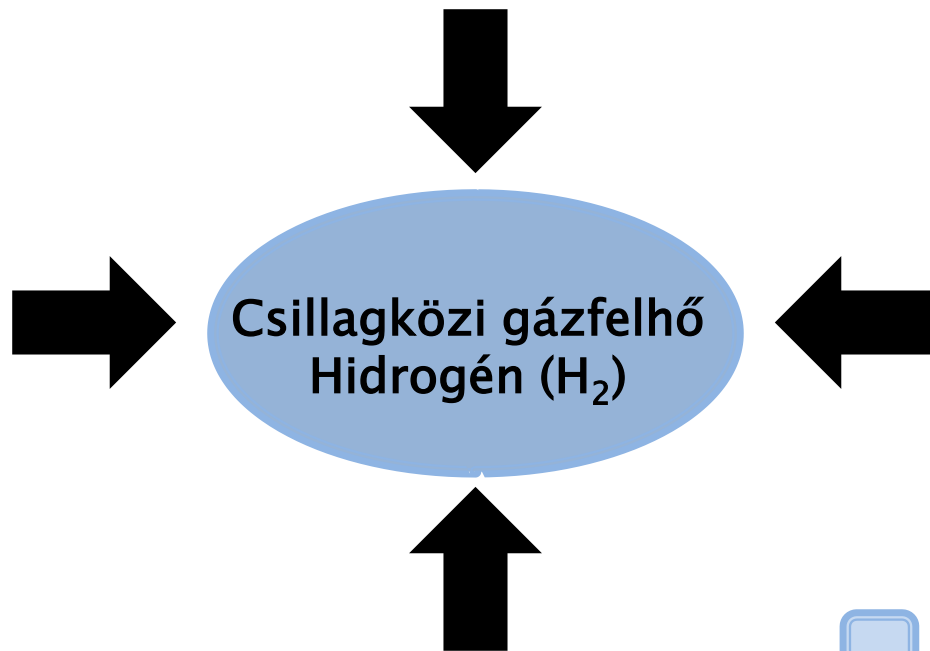


A csillagok élete  
és

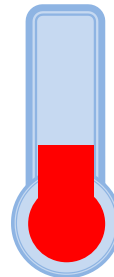
a neutroncsillagok születése

# A csillagok születése

A csillagközi gázfelhő a gravitáció hatására összehúzódik



A gáz hőmérséklete alacsony

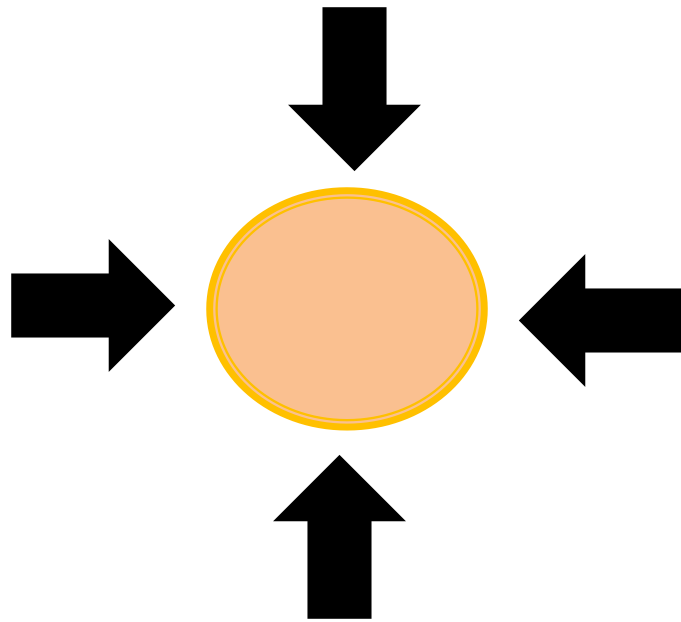


NGC 346 „csillagbölcső” Hubble



# A csillagok születése

Az összehúzó gázfelhő felmelegszik



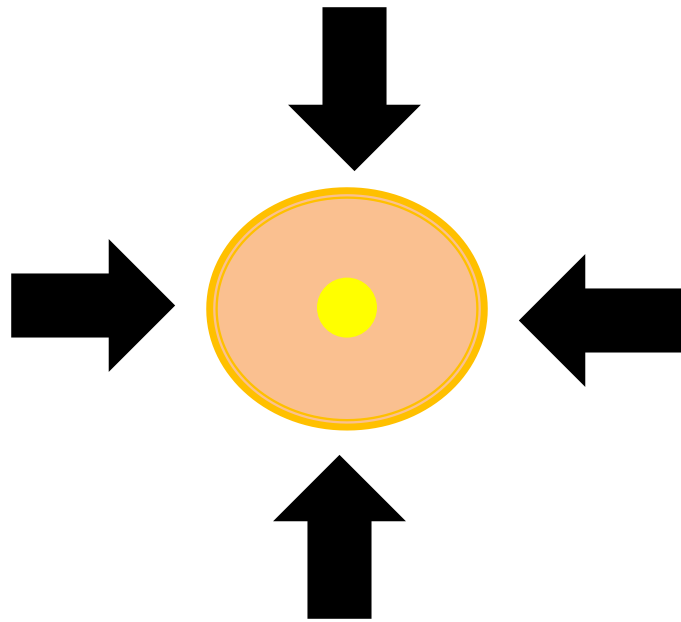
A hőmérséklet egyre magasabb



NGC 346 „csillagbölcső” Hubble

# A csillagok születése

A középpontban elég magasra nő a hőmérséklet ahhoz, hogy meginduljunk a hidrogén fúziója



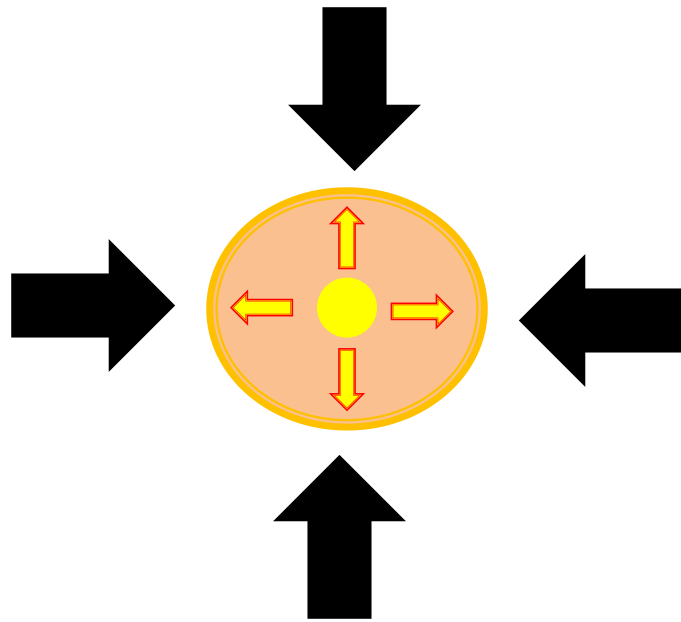
A hidrogén fúziója fűti a gázt



NGC 346 „csillagbölcső” Hubble

# A csillagok születése

A csillag működése során a fúzió által létrehozott nyomás ellen tart a gravitációnak



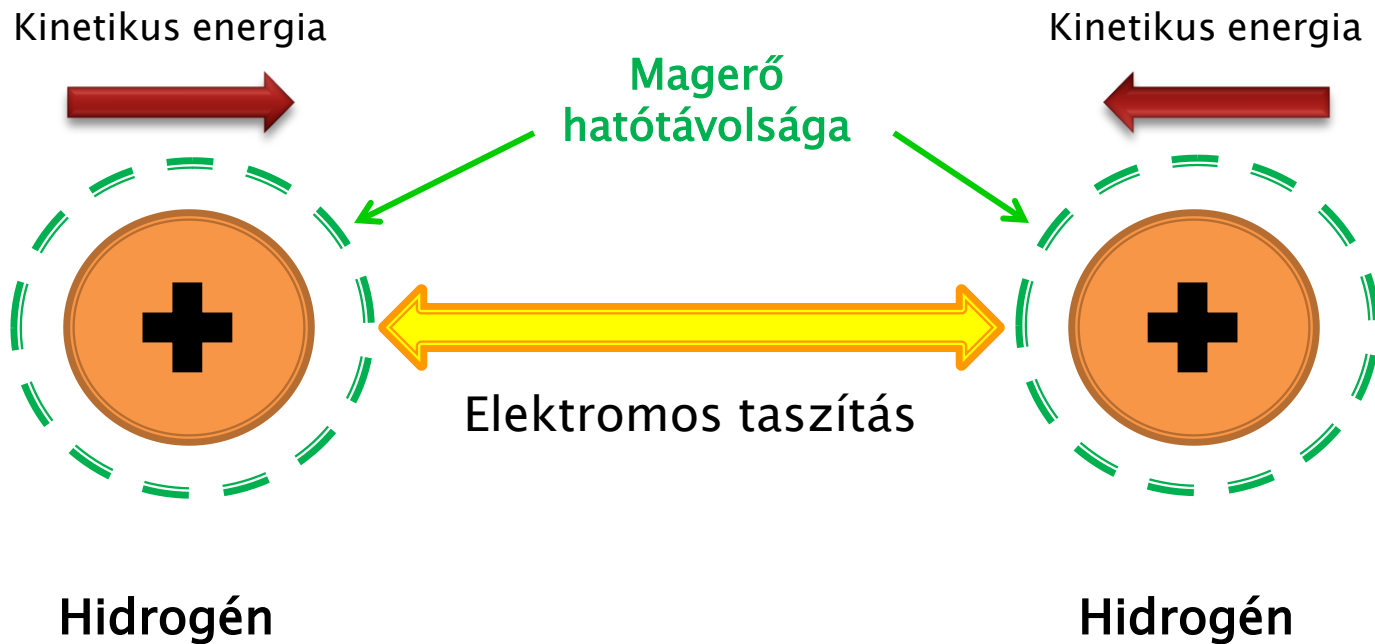
A hidrogén fúziója fűti a gázt



NGC 346 „csillagbölcső” Hubble

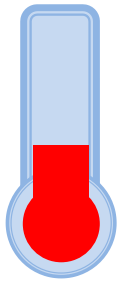


# A hidrogén fúziója

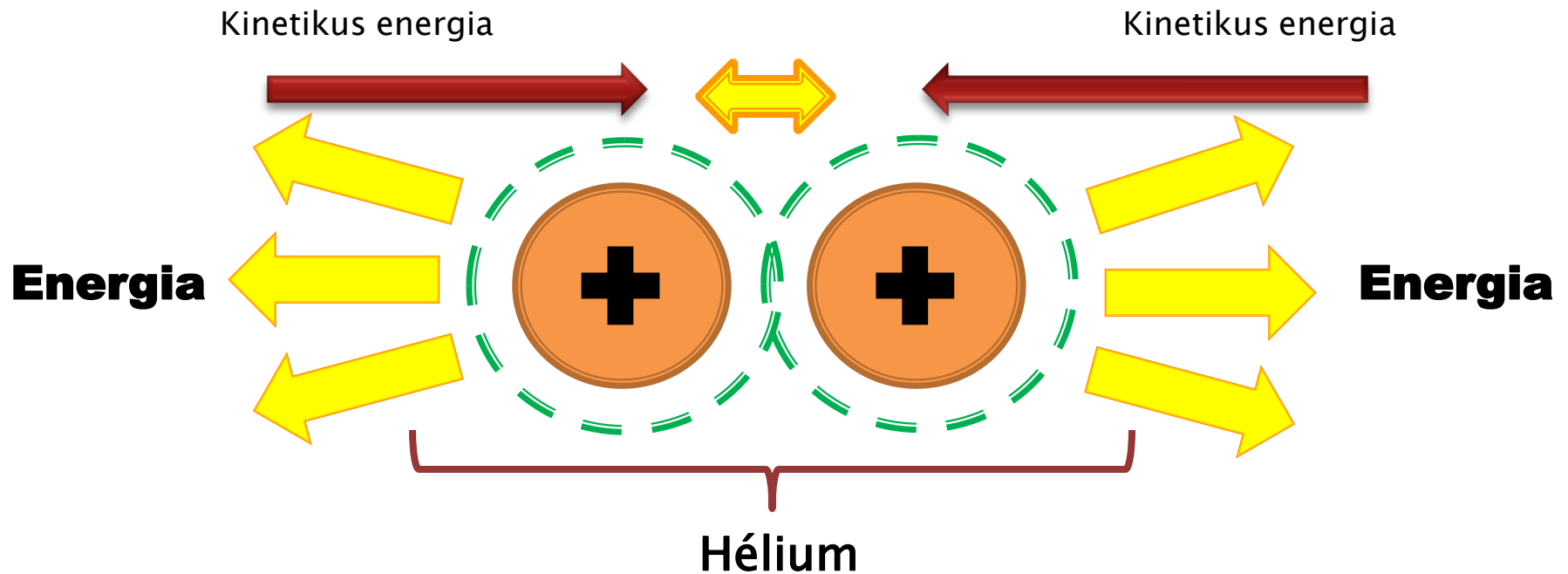


Alacsony hőmérséklet:

- A **kinetikus energia** kicsi és nem tudja legyőzni az **elektromos taszítást**
- A magok nem tudnak elég közel kerülni, hogy a **magerő** működésbe lépjen

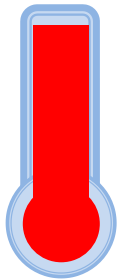


# A hidrogén fúziója



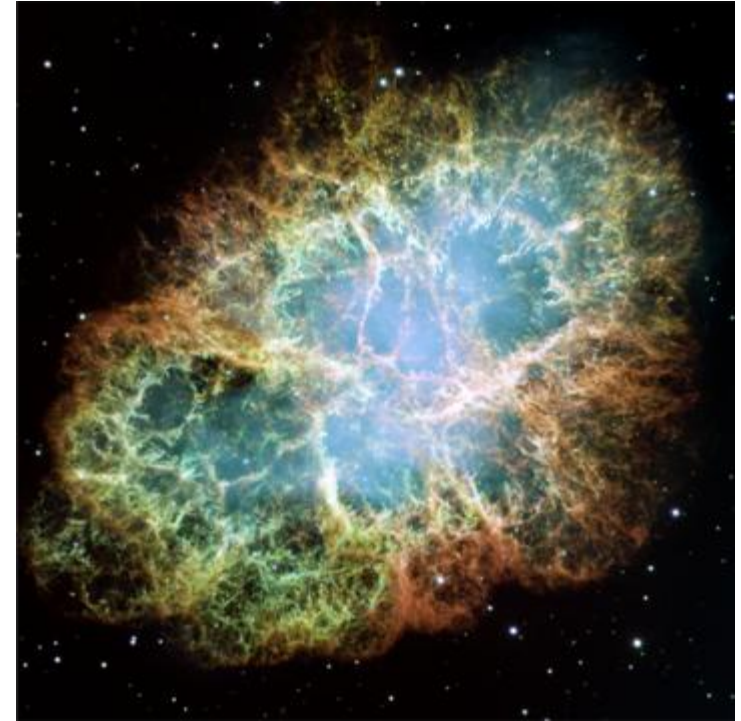
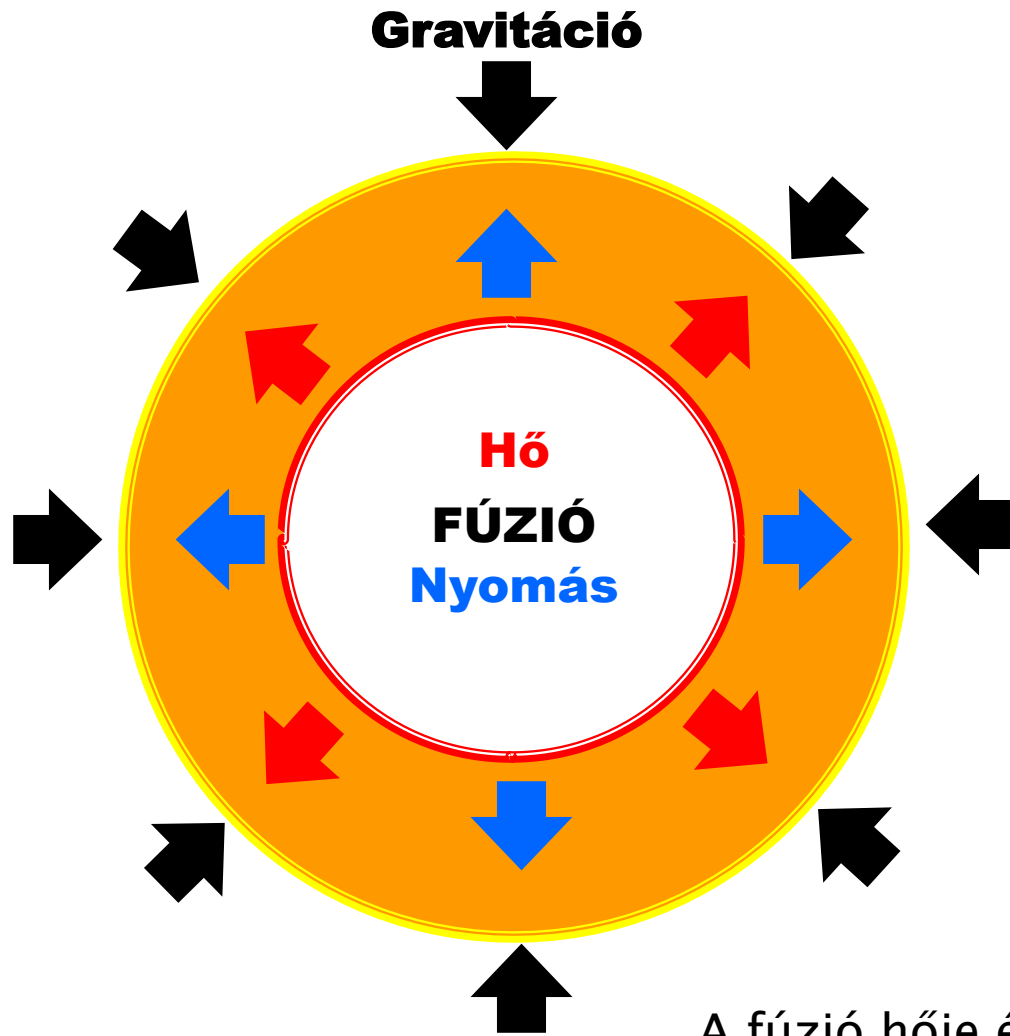
Magas hőmérséklet:

- A **kinetikus energia** legyőzni az **elektromos taszítást**
- A magok közel kerülnek egymáshoz kölcsönhatásba lépnek energia szabadul fel és egy új elem, Hélium keletkezik





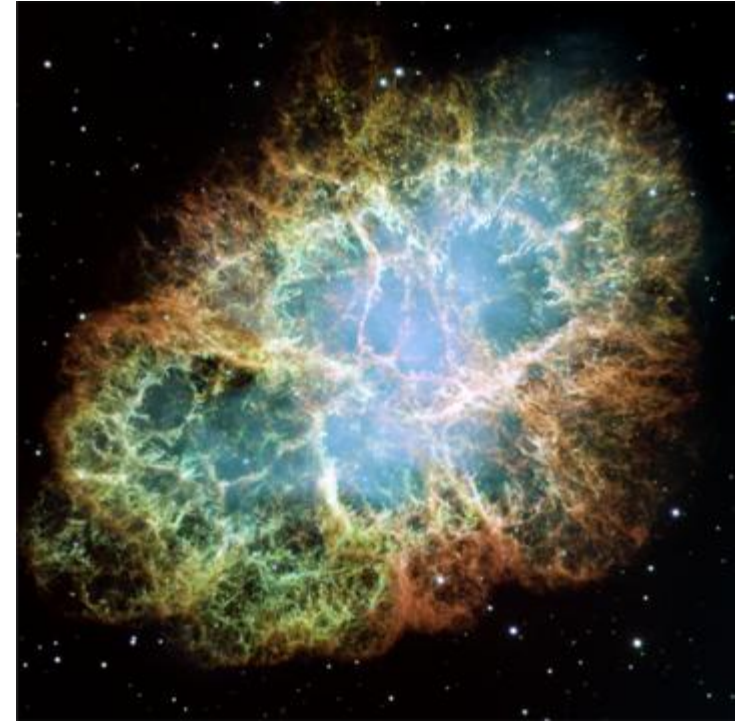
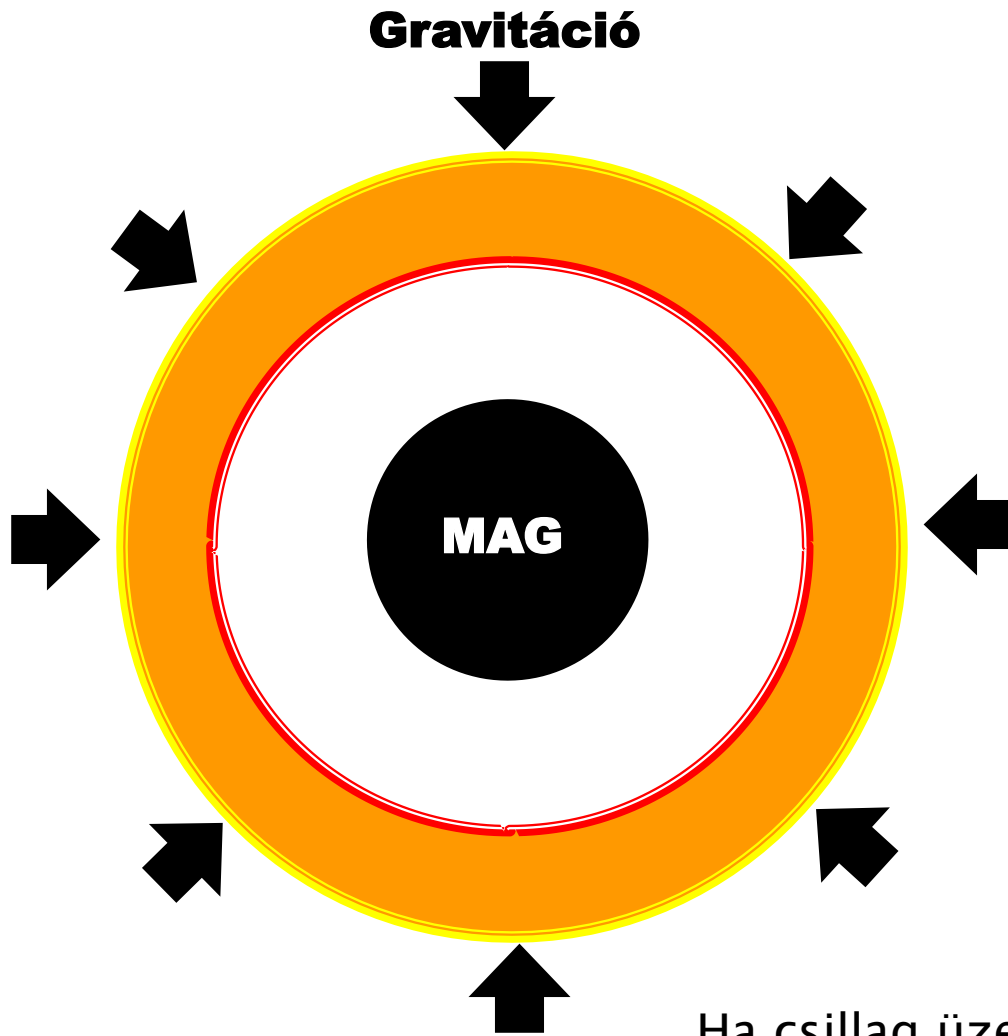
# A csillagok halála



Rák köd, szupernóva maradványa

A fúzió hője és nyomása egyensúlyban van a gravitációval

# A csillagok halála



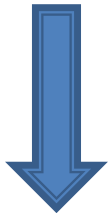
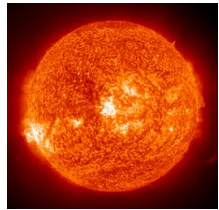
Rák köd, szupernóva maradványa

Ha csillag üzemanyaga elfogy, az egyensúly hirtelen felbomlik és bekövetkezik a szupernova robbanás.



# Neutroncsillagok keletkezése

A Naphoz hasonló  
tömegű csillagok

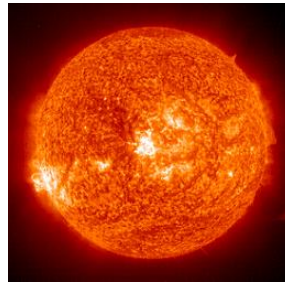


Vörös óriás



Fehér törpe

A Napnál 4–8-szor  
nagyobb tömegű csillagok

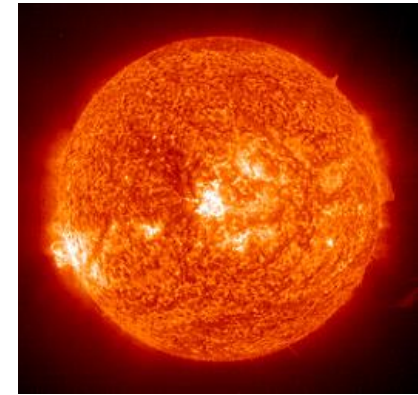


**Szupernóva robbanás**



**Neutroncsillag**

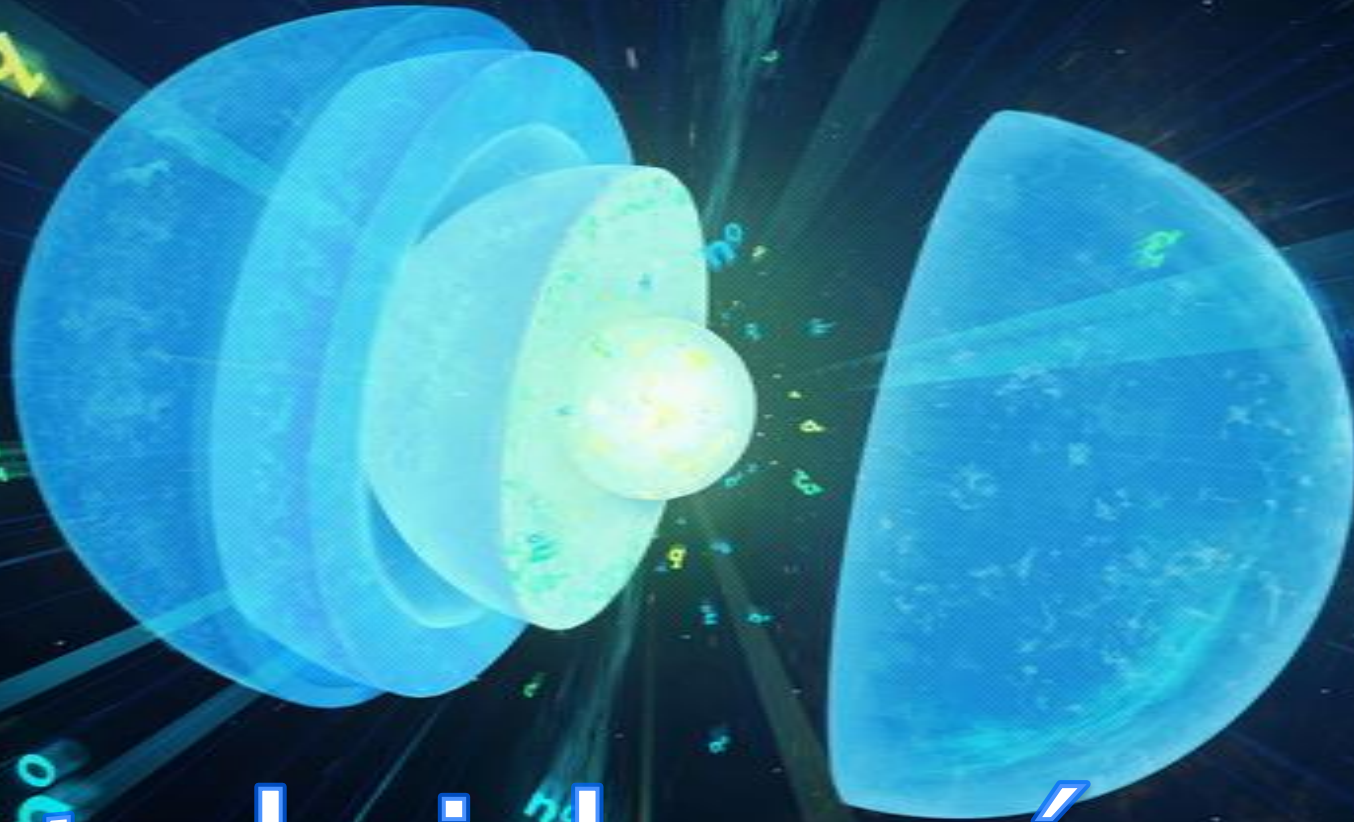
8 naptömegnél  
nagyobb csillagok



Fekete lyuk

A visszamaradó mag

# Neutroncsillagok



## tulajdonságai

Ábra. <https://www.quantamagazine.org/squishy-or-solid-a-neutron-stars-insides-open-to-debate-20171030/>



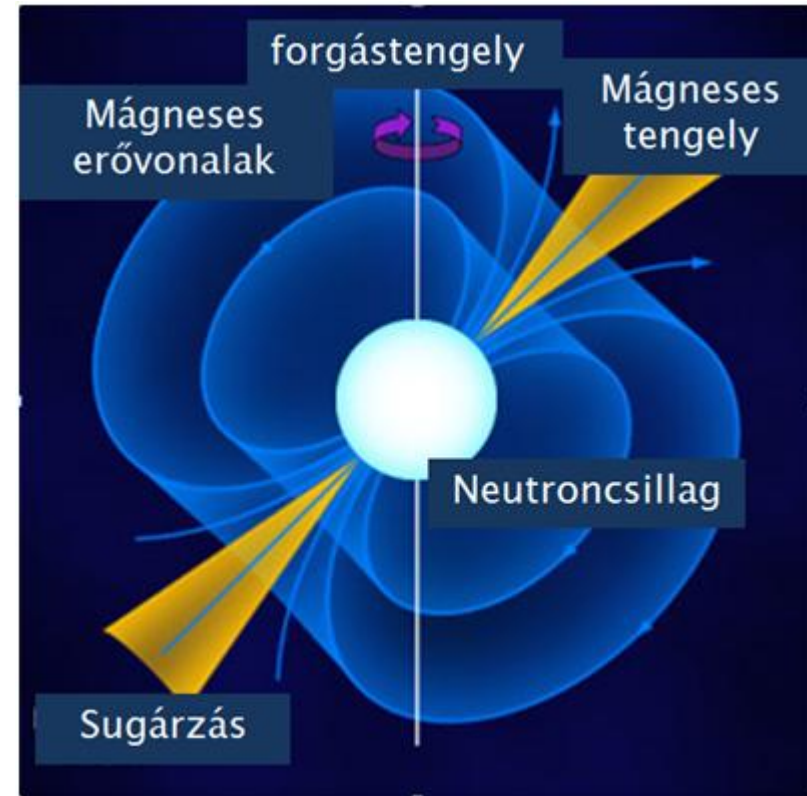
# Neutroncsillagok és Pulzárok

- ▶ Kozmikus világítótorony

mágneses tengely  $\neq$  forgástengely

- ▶ Az első pulzárt 50 éve, 1967-ben fedezte fel Jocelyn Bell Burnell és Antony Hewish
  - A kibocsájtott jel olyan szabályos volt, hogy először földönkívüli rádióadásnak vélték
- ▶ Forgási periódus:

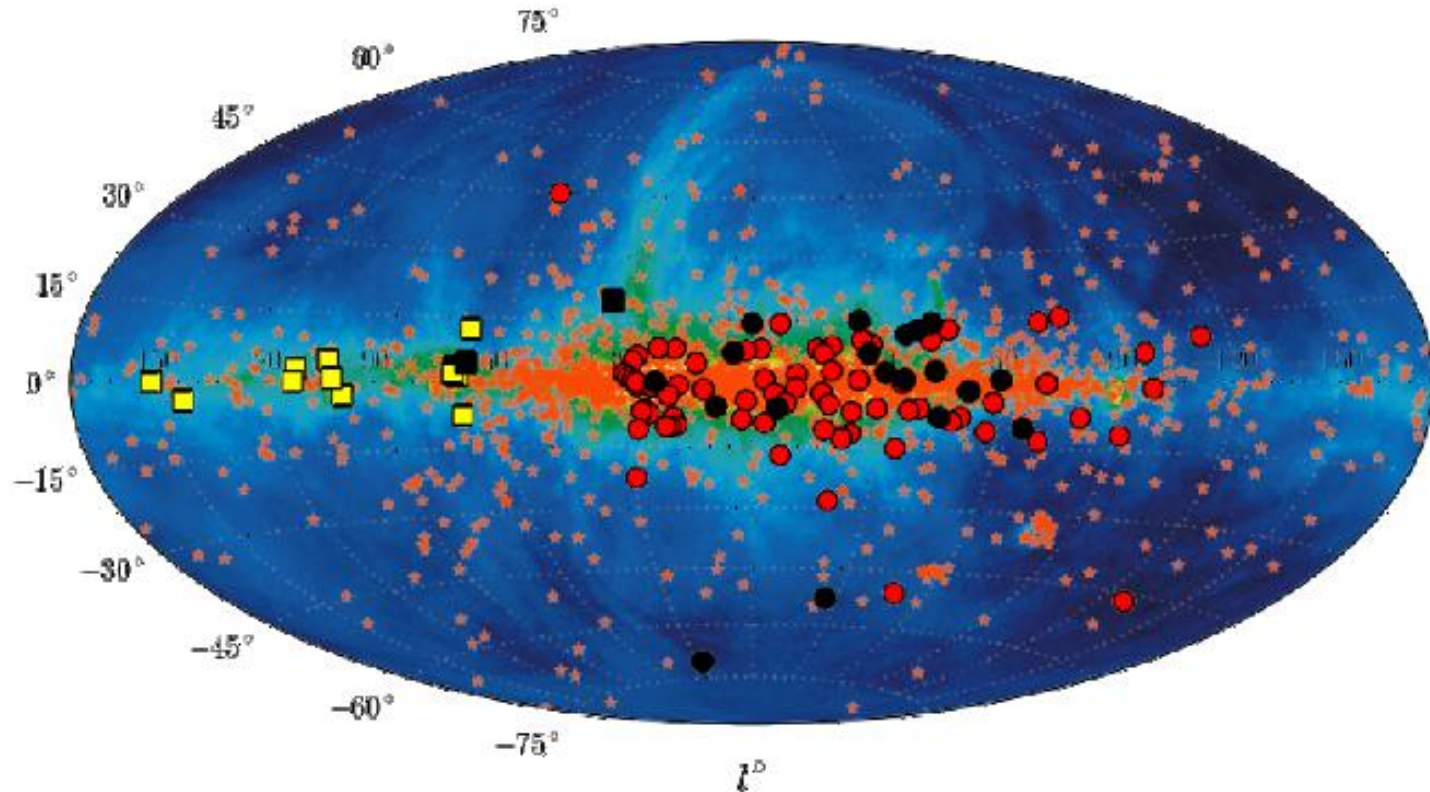
1/1000 s – 10 s



Mágneses mező

**CERN szupravezető mágnes: 10 T**  $\ll$  **10<sup>9</sup> T**

# Neutroncsillagok és Pulzárok



Az égbolt röntgenteleszkópos képe

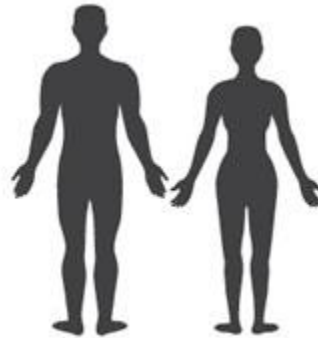
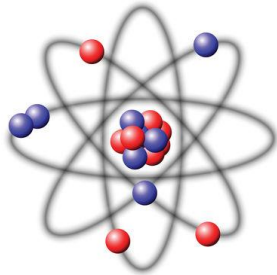
**Sárga, piros:** szokásos pulzárok **fekete:** miliszekundumos pulzárok

[Conducting The Deepest All-Sky Pulsar Survey Ever: The All-Sky High Time Resolution Universe Survey](#) – HTRU Collaboration (Ng, Cherry for the collaboration) IAU Symp. 291 (2013) 53–56  
arXiv:1401.2826 [astro-ph.HE]



# Miért érdekesek a neutroncsillagok?

Összekapcsolják az „égi”, nagy léptékű fizikát és a kis távolságok, részecskék, atomok fizikáját.



1–300 db

$\sim 5 \cdot 10^{28}$  db

$\sim 3 \cdot 10^{57}$  db

*Ahányszor nagyobb egy ember egy atomnál, közelítőleg annyszor nagyobb egy tipikus csillag egy embernél.*

**Nukleonok száma**  
(nukleonok: az atommagot alkotó részecskék)

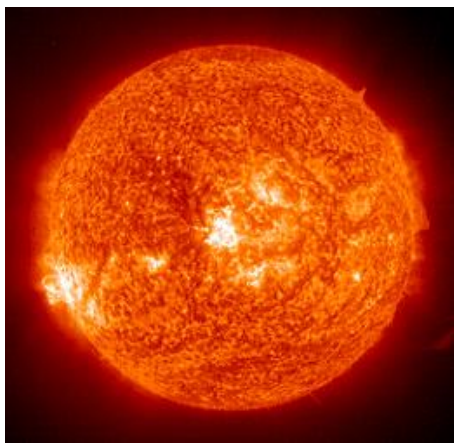
**A FIZIKA UNIVERZÁLIS**, ugyanazok a törvények írják le:

- az égitesteket, csillagokat
- földi világunkat
- az atomok, részecskék világát

# Neutroncsillagok mérete

## Nap

R = 700 000 km



×120

## Föld

R = 6000 km



×4

## Hold

R = 1700 km

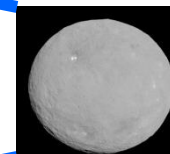


×4

## Ceres

(legnagyobb aszteroida)

R = 500 km



By Ceres and Vesta images: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDAPallas image: Hubble Space Telescope/STScIHygiea image: Astronomical Institute of the Charles University: Josef Ďurech, Vojtěch SidorinImage modified by PlanetUser using Photoshop. - File:PIA19562-Ceres-DwarfPlanet-Dawn-RC3-image19-20150506.jpgFile:Vesta full mosaic.jpgFile:PallasHST2007.jpgFile:10 Hygiea (Lightcurve Inversion).png, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45250997>

# Neutroncsillag mérete

## Nap

R = 700 000 km

## Föld

R = 6000 km

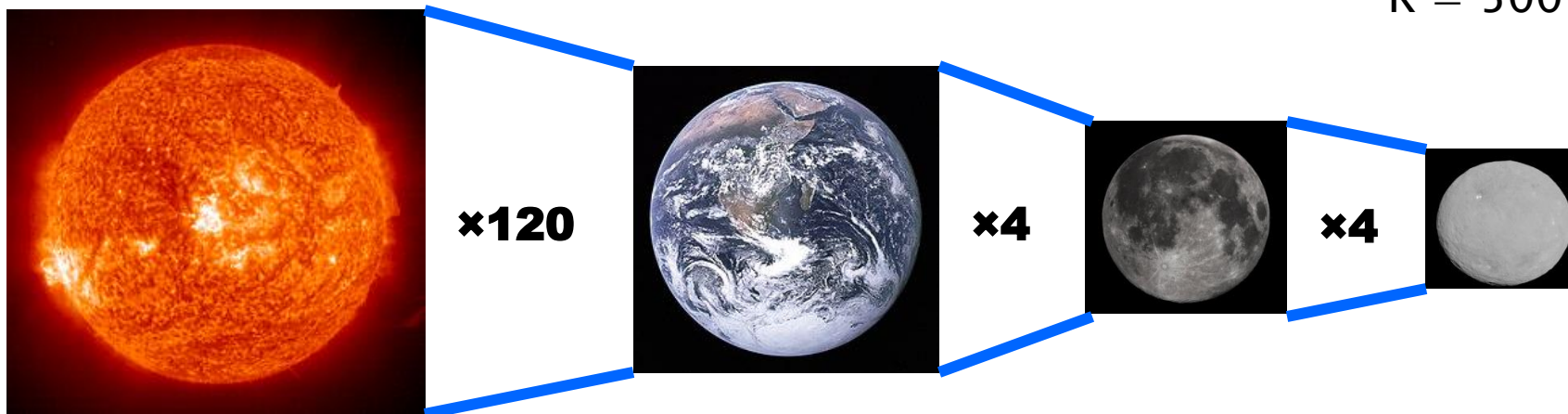
## Hold

R = 1700 km

## Ceres

(legnagyobb aszteroida)

R = 500 km



**A neutroncsillag kisebb mint egy  
aszteroida !!  
Mihez hasonlíthatjuk a méretét?**

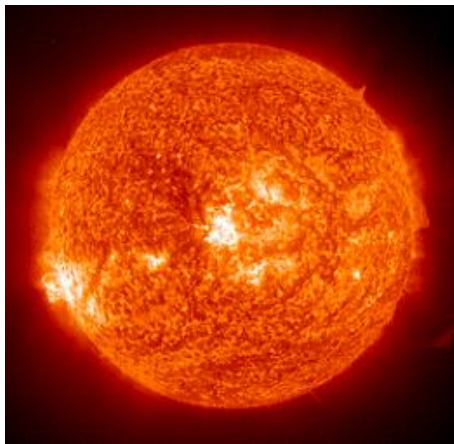
By Ceres and Vesta images: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDAPallas image: Hubble Space Telescope/STScIHygiea image: Astronomical Institute of the Charles University: Josef Ďurech, Vojtěch SidorinImage modified by PlanetUser using Photoshop. - File:PIA19562-Ceres-DwarfPlanet-Dawn-RC3-image19-20150506.jpgFile:Vesta full mosaic.jpgFile:PallasHST2007.jpgFile:10 Hygiea (Lightcurve Inversion).png, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45250997>



# Neutroncsillagok mérete

**Nap**

R = 700 000 km



**×120**

**Föld**

R = 6000 km



**×4**

**Hold**

R = 1700 km

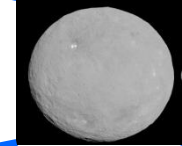


**×4**

**Ceres**

(legnagyobb aszteroida)

R = 500 km



**×50**



**Neutroncsillag**

R = 10 km

**Budapest**

R = 10 km

# Neutroncsillagok mérete



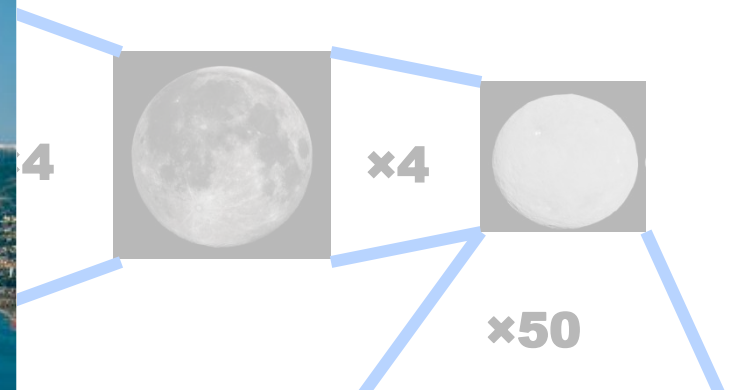
Neutroncsillag látképe Vancouver felett



**Neutroncsillag**  
 $R = 10 \text{ km}$

**Hold**  
 $R = 1700 \text{ km}$

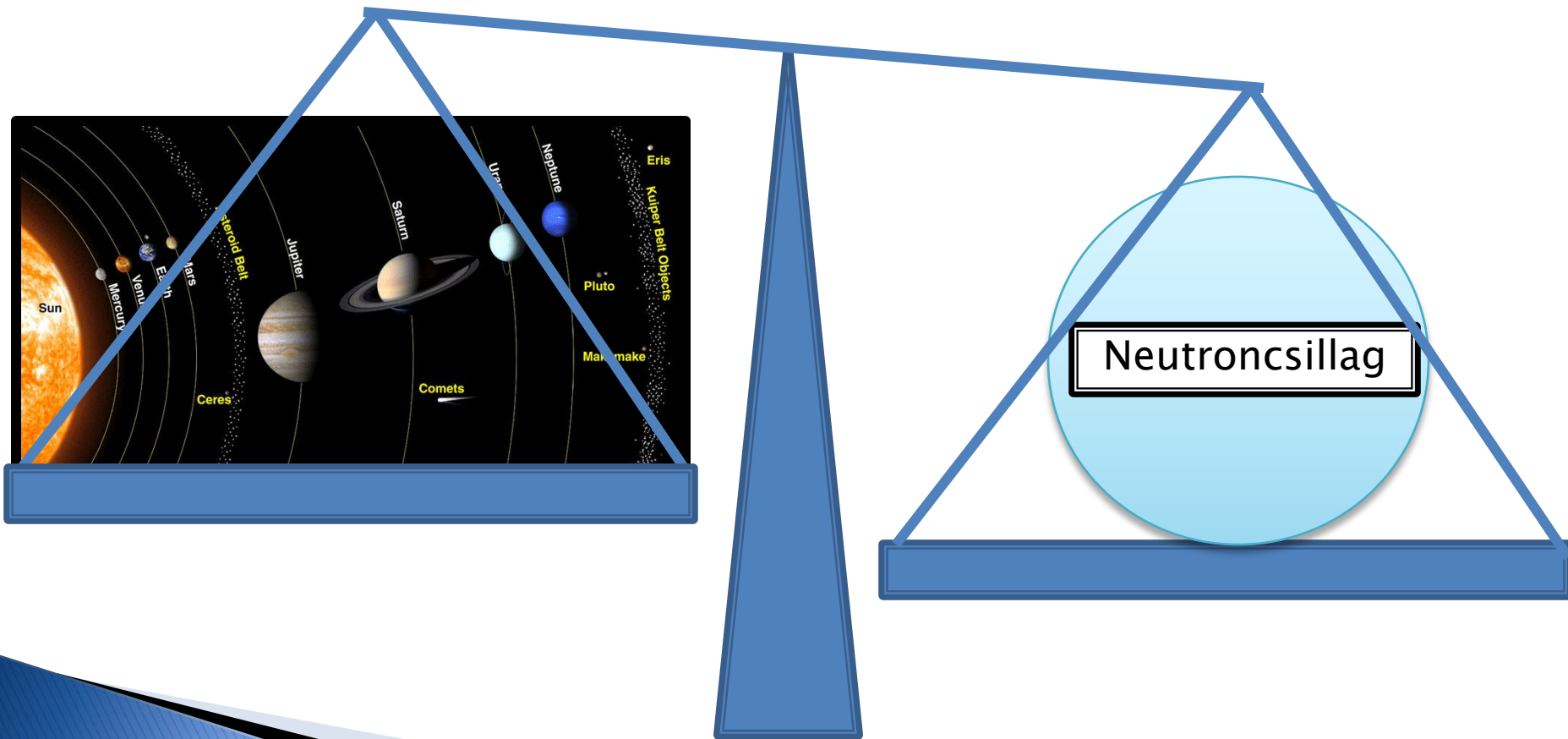
**Ceres**  
(legnagyobb aszteroida)  
 $R = 500 \text{ km}$



**Budapest**  
 $R = 10 \text{ km}$

# Neutroncsillagok tömege

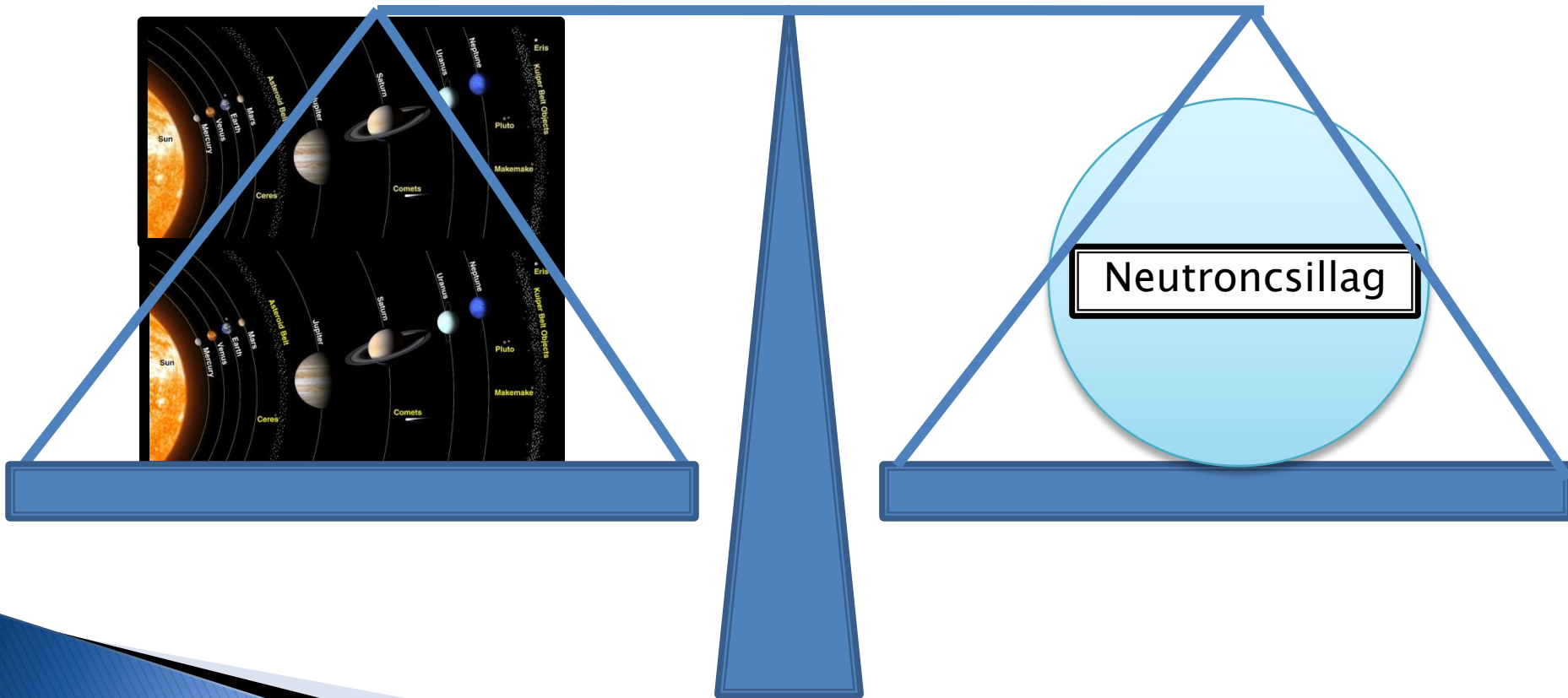
1–2 Nap(rendszer)nek megfelelő tömeg





# Neutroncsillagok tömege

1–2 Nap(rendszer)nek megfelelő tömeg



# Neutroncsillagok Sűrűsége

A víz sűrűségéhez képest becsüljük meg:

$$\frac{1 \text{ Nap tömeg}}{10 \text{ km sugarú gömb térfogata}} \approx 10^{14} \approx \frac{56 \text{ proton tömege}}{\text{Vas atom térfogata}}$$

Neutron csillag sűrűsége

Vas atommag sűrűsége

A neutroncsillag egy nagy atommag!



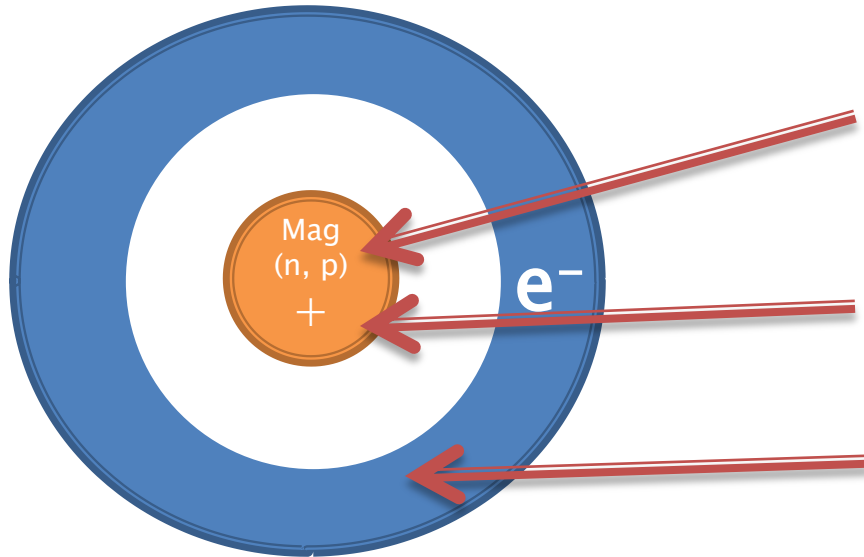
**x900**  $\approx$



Egy teáskanálnyinak megfelelő anyag a neutroncsillagból 900 Gízai piramisnak megfelelő tömegű.

# A nagy sűrűség titka

Atomok alaphelyzetben



**Az atom alkotórészei:**

- **Neutron:**
  - semleges töltésű
  - Nagy tömegű
- **Proton:**
  - Pozitív töltésű
  - Nagy tömegű
- **Elektron:**
  - Negatív töltésű
  - Kis tömegű

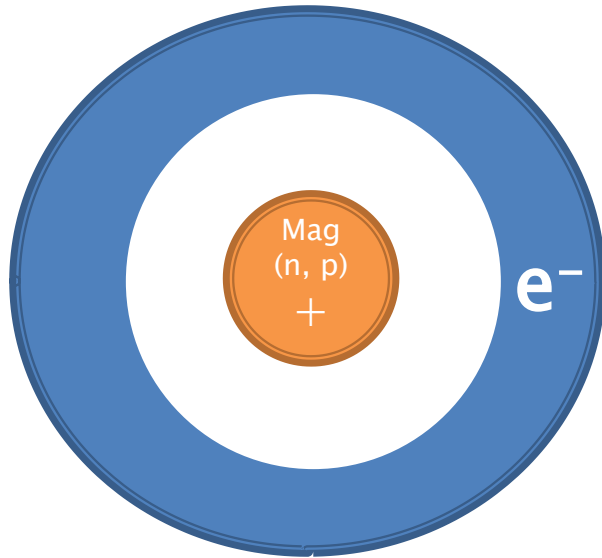
A mag kicsi, míg az  $e^-$  felhő nagy!

A kvantummechanika nem engedi, hogy az elektron a magba kerüljön, a köztük lévő vonzás ellenére sem.



# A nagy sűrűség titka

Atomok alaphelyzetben



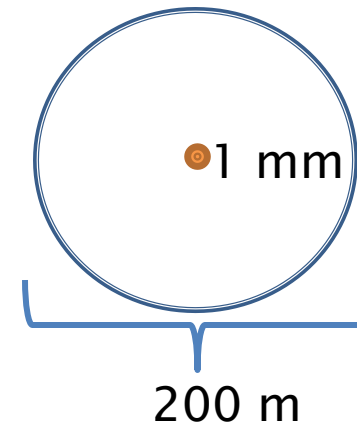
A mag kicsi, míg az  $e^-$  felhő nagy!

A kvantummechanika nem engedi, hogy az elektron a magba kerüljön, a köztük lévő vonzás ellenére sem.

**Az atom nagy része üres!**

Gondolatban felnagyítva:

- Az atommag : **1 mm**
- Az elektron **100m** -re van tőle!

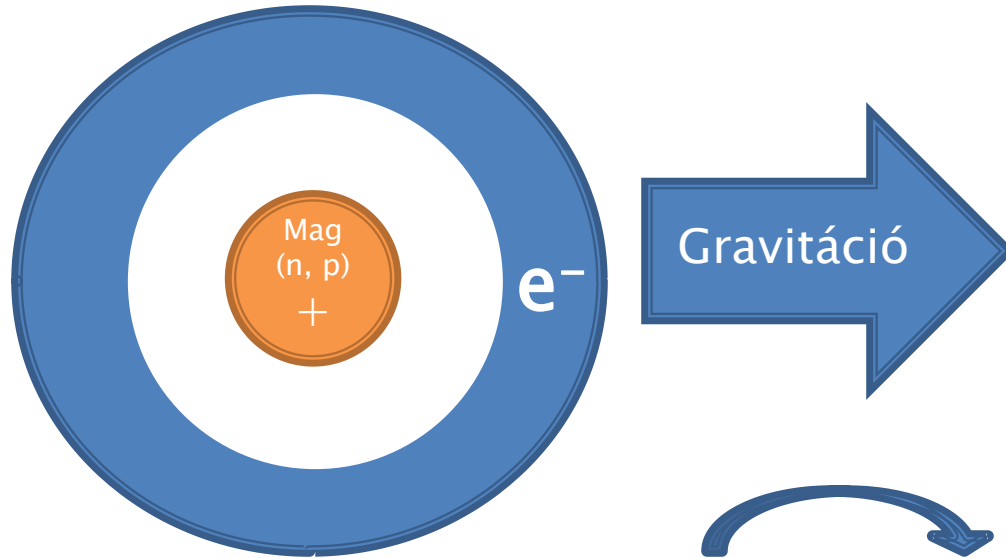


**Mennyire üres?**

- Balatonnyi térfogatba  $\rightarrow$  atom
- 1 teáskanál cukrot tennék  $\rightarrow$  atom mag

# A nagy sűrűség titka

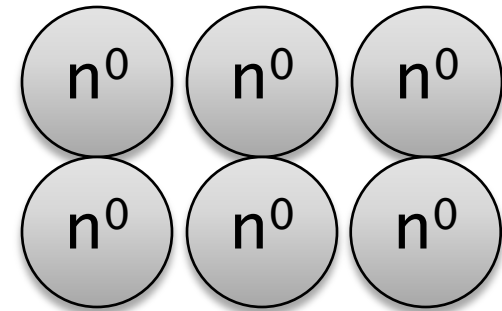
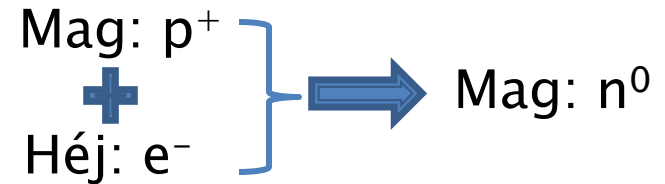
Atomok alaphelyzetben



A mag kicsi, míg az  $e^-$  felhő nagy!

A kvantummechanika nem engedi, hogy az elektron a magba kerüljön, a köztük lévő vonzás ellenére sem.

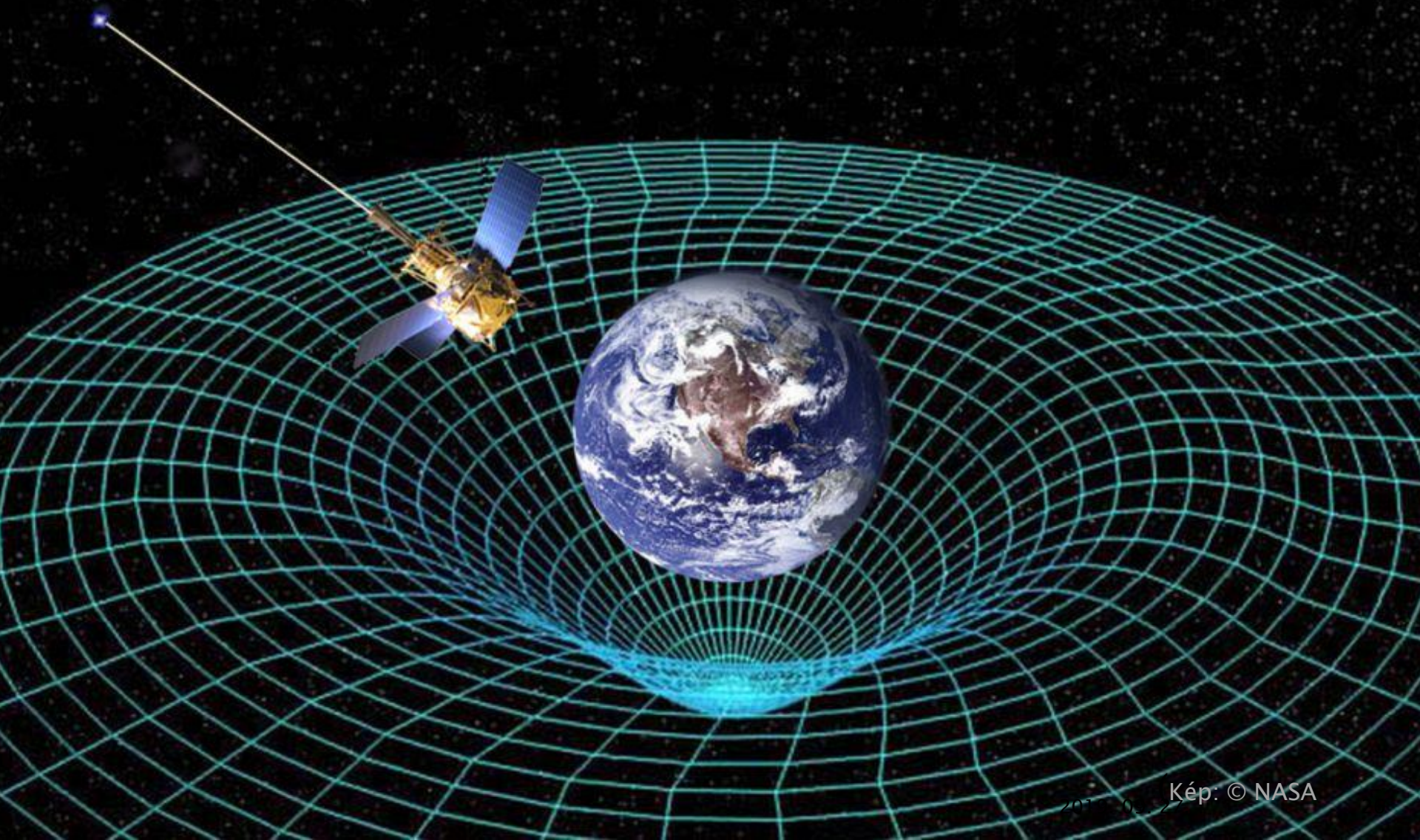
Nagy nyomású maganyag



**$10^{-15}$  szerez térfogat csökkenés**

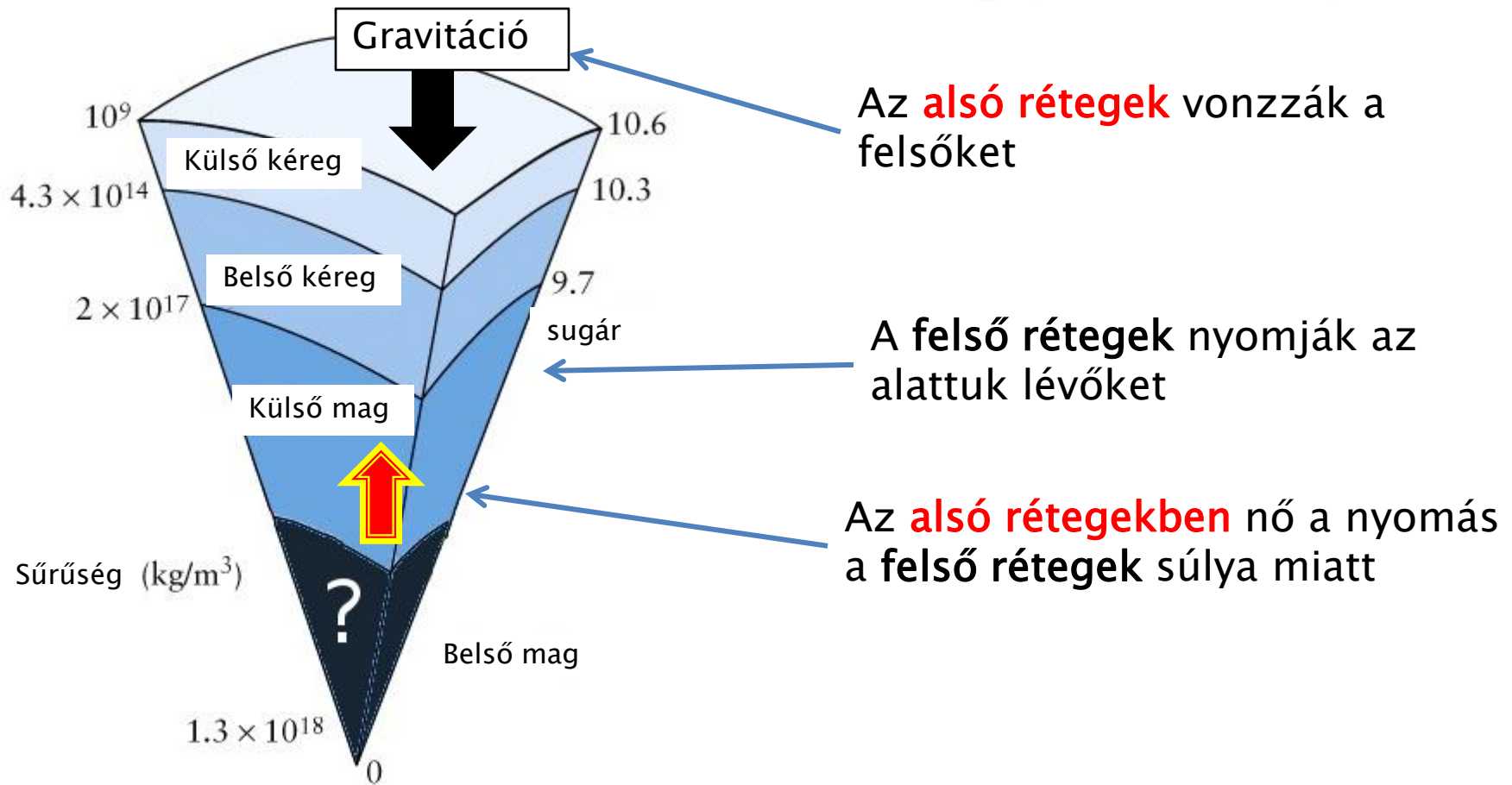
A csillag tömegének 90%-át neutronokból és protonokból álló nagy sűrűségű maganyag adja. A maganyag 85–90 %-át neutronok adják, innen az elnevezés.

# Neutroncsillagok és az általános relativitáselmélet





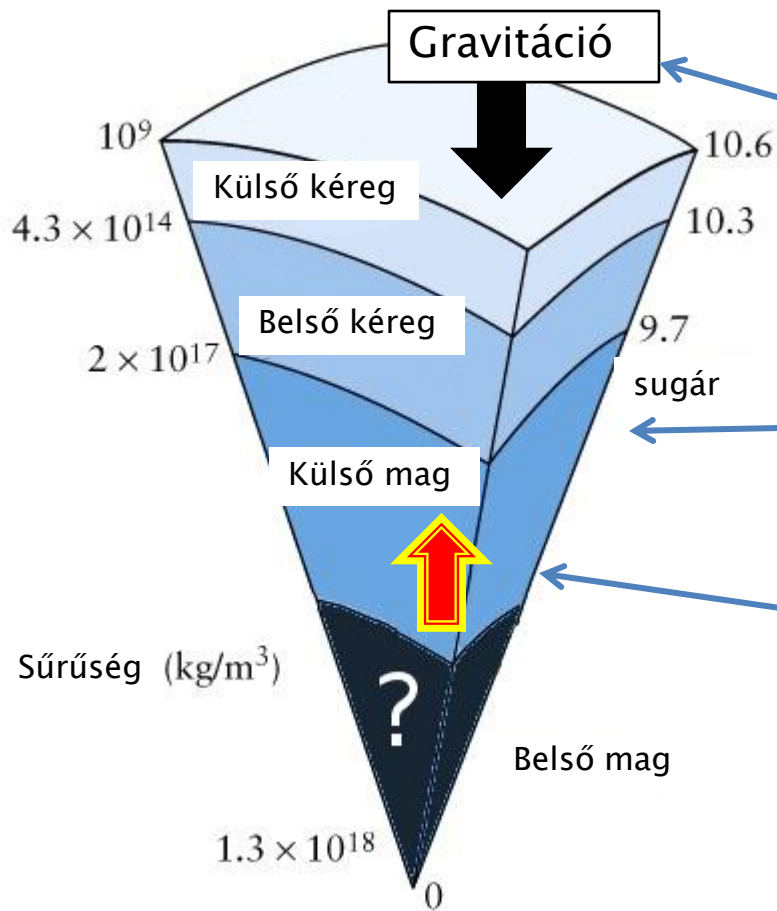
# Hidrosztatikai egyensúly



A neutroncsillag egy szelete

<https://apatruno.wordpress.com/neutron-stars/>

# Hidrosztatikai egyensúly



Az **alsó rétegek** vonzzák a felsőket

A **felső rétegek** nyomják az alattuk lévőket

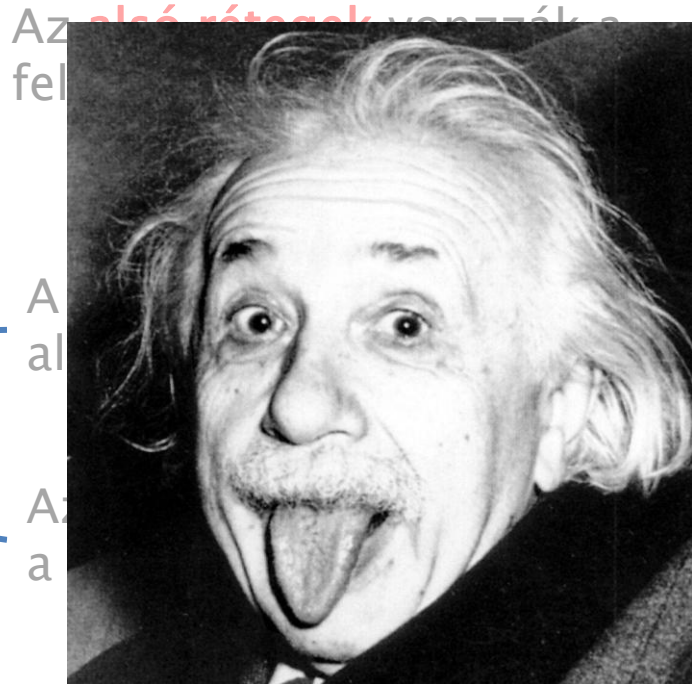
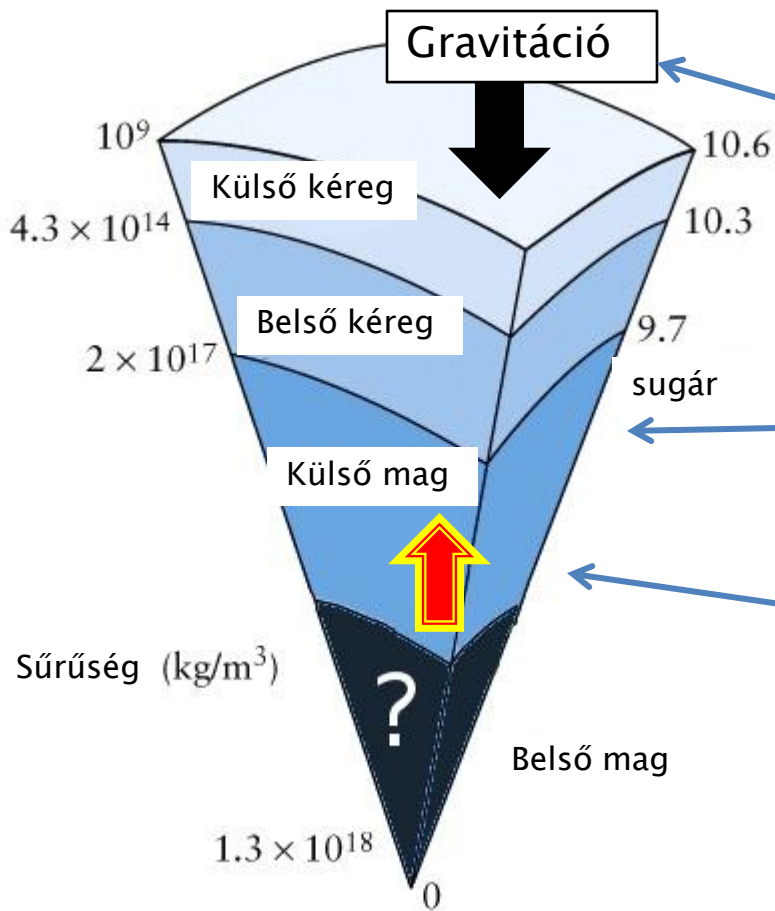
Az **alsó rétegekben** nő a nyomás a **felső rétegek** súlya miatt

## Newtoni gravitáció

A csillag tömege **nő**  $\Rightarrow$  A gravitáció **nő**  $\Rightarrow$  A nyomás a magban **nő**

A nyomás növekedésének nincs felső határa, ezért a csillag bármilyen nagyra nőhet

# Hidrosztatikai egyensúly



## Einsteini gravitáció





# Hidrosztatikai egyensúly relativisztikusan

A csillag tömege nő



Gravitáció nő nyomás és a tömeg miatt



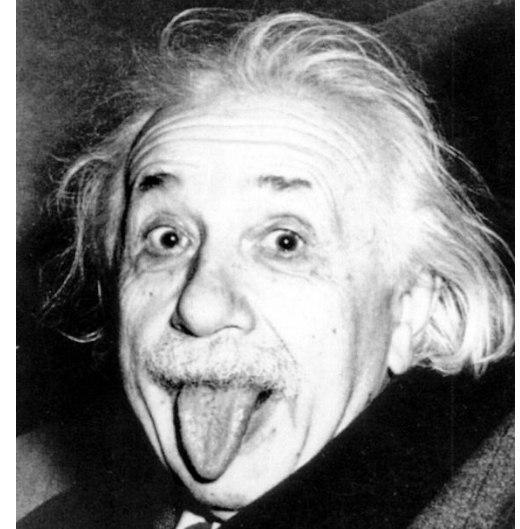
A csillagot összehúzza a gravitáció



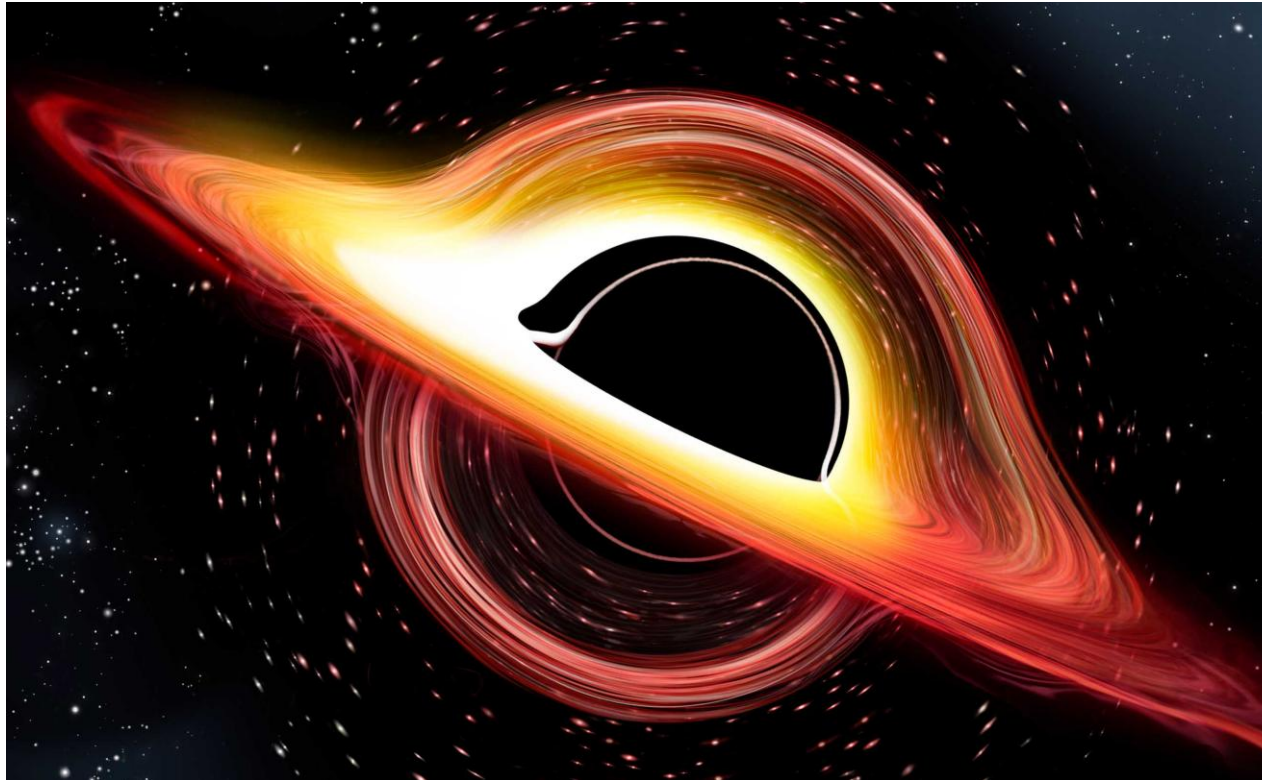
A csillag egyre sűrűbb és kisebb



A Schwarzschild-sugár: Ha az égitest sugara kisebb, mint a tömegéhez rendelt  $R=2GM/c^2$  sugár, akkor **feketelyukká** válik.



# Hidrosztatikai egyensúly relativisztikusan

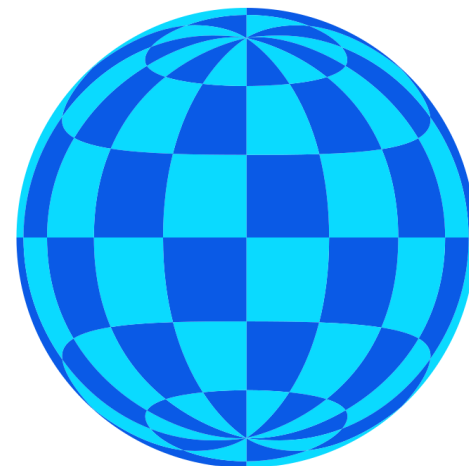


A Schwarzschild-sugár: Ha az égitest sugara kisebb, mint a tömegéhez rendelt  $R=2GM/c^2$  sugár, akkor **feketelyukká** válik.

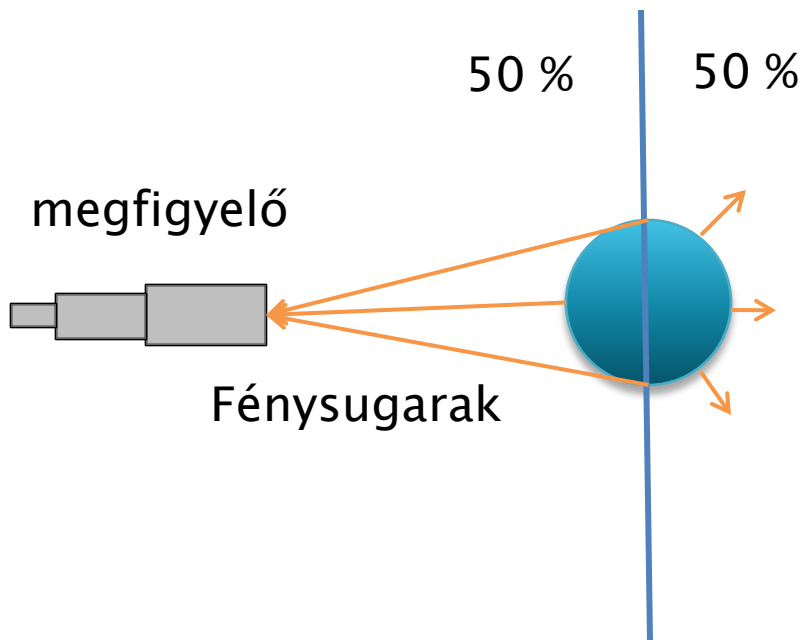
# A neutroncsillagok relativisztikus tulajdonságai

- ▶ Az univerzum legsűrűbb objektumai. Van olyan fekete lyuk aminél sűrűbbek!
- ▶ A neutroncsillagok már „majdnem” fekete lyukak
- ▶ A szökési sebesség a felszínen a fénysebesség kb. 40 %-a.
- ▶ A fényelhajlás miatt neutroncsillagnak felszínének több mint fele látható egyszerre

Égitest	Schwarzschild – sugár/Sugár
Föld	$10^{-12}$
Nap	$10^{-6}$
neutroncsillag	0.3–0.6
Feketelyuk	1

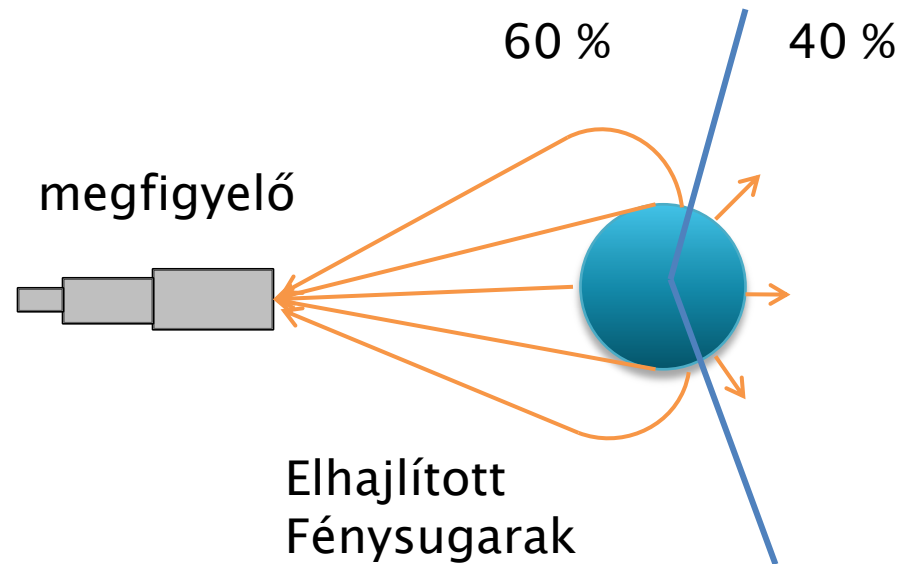






### Normál eset:

Csak a gömb fele látszik, mert a fénysugarak csak onnan érnek a szemünkbe



### Neutroncsillag:

A túloldali félgömb egy részét is látjuk, mert a gravitáció elhajlítja a fény útját

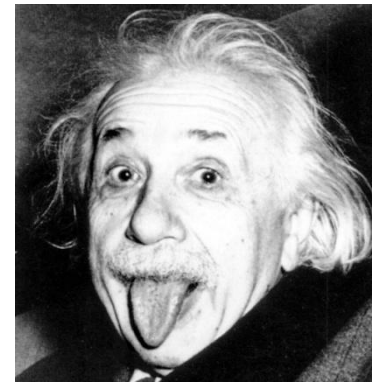
# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

## Mi az a Gravitációs hullám ?

Mi hullámszik?



A tér és az idő...



# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

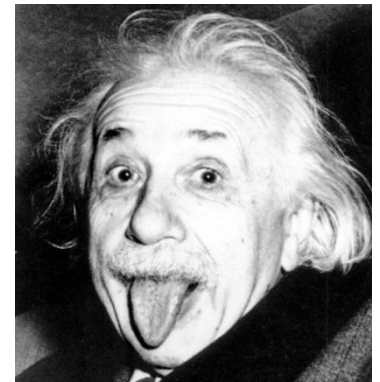
## Mi az a Gravitációs hullám ?

Mi hullámzik?



Ahova elér a hullám ott megváltozik a

- Testek közötti távolság
- És az idő múlása





# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

## Mi az a Gravitációs hullám ?

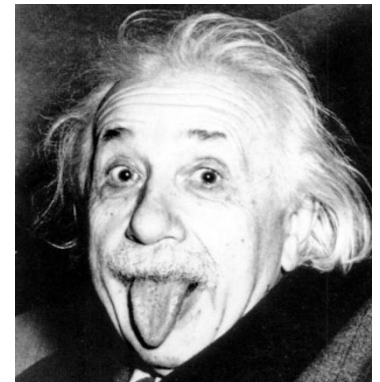
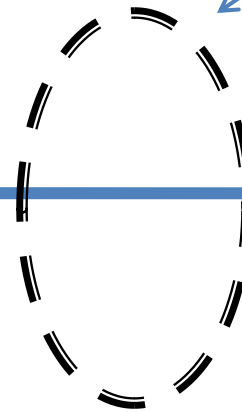
Mi hullámzik?



Hullám terjedési iránya



Kör alakban elhelyezett kavicsok



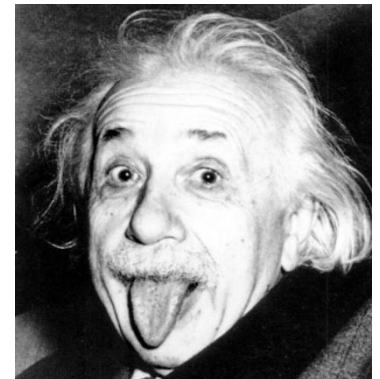
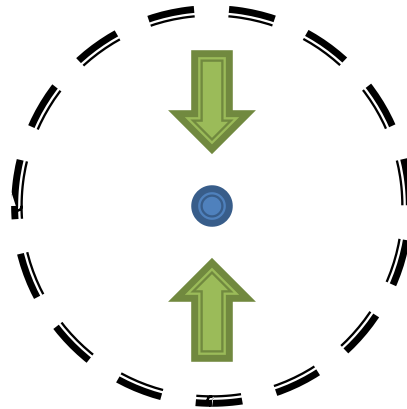
# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

## Mi az a Gravitációs hullám ?

### Mi hullámszik?



A haladási irányból nézve  
a kavicsokra erő hat és  
elmozdulnak

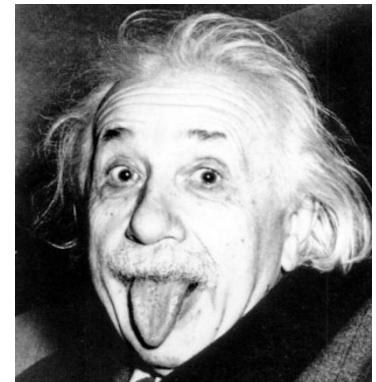
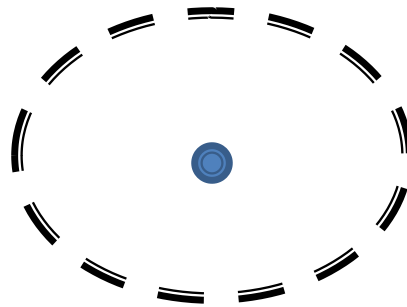


# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

## Mi az a Gravitációs hullám ?

### Mi hullámzik?

A haladási irányból nézve  
a kavicsok közötti távolság  
megváltozik



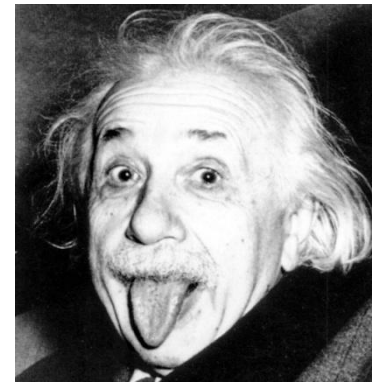
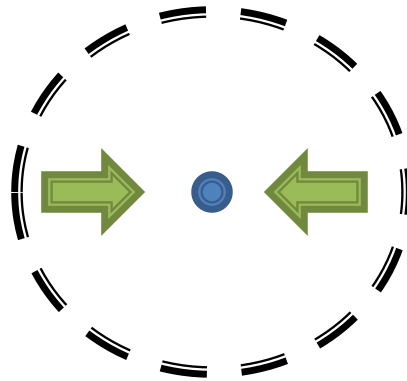
# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

## Mi az a Gravitációs hullám ?

### Mi hullámzik?



A haladási irányból nézve  
a kavicsok közötti távolság  
megváltozik





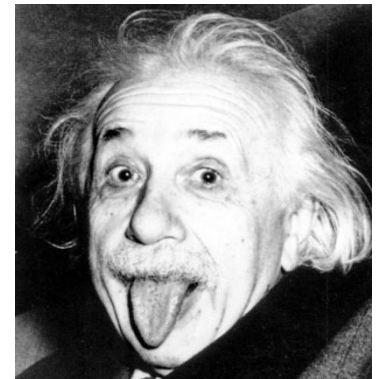
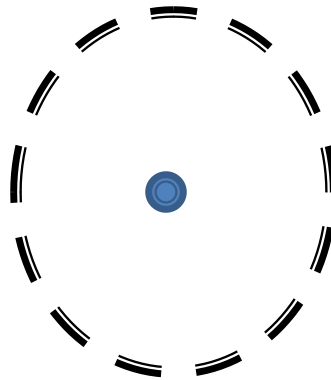
# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

## Mi az a Gravitációs hullám ?

### Mi hullámzik?



A haladási irányból nézve  
a kavicsok közötti távolság  
megváltozik



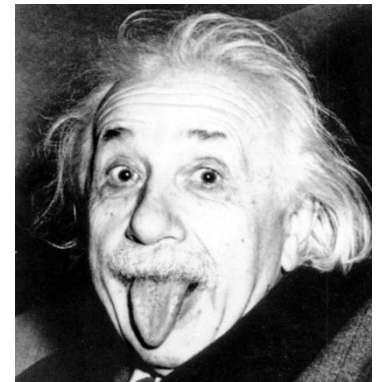
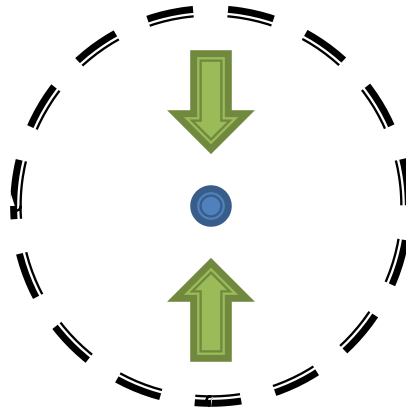
# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

## Mi az a Gravitációs hullám ?

### Mi hullámzik?



A haladási irányból nézve  
a kavicsokra erő hat és  
elmozdulnak

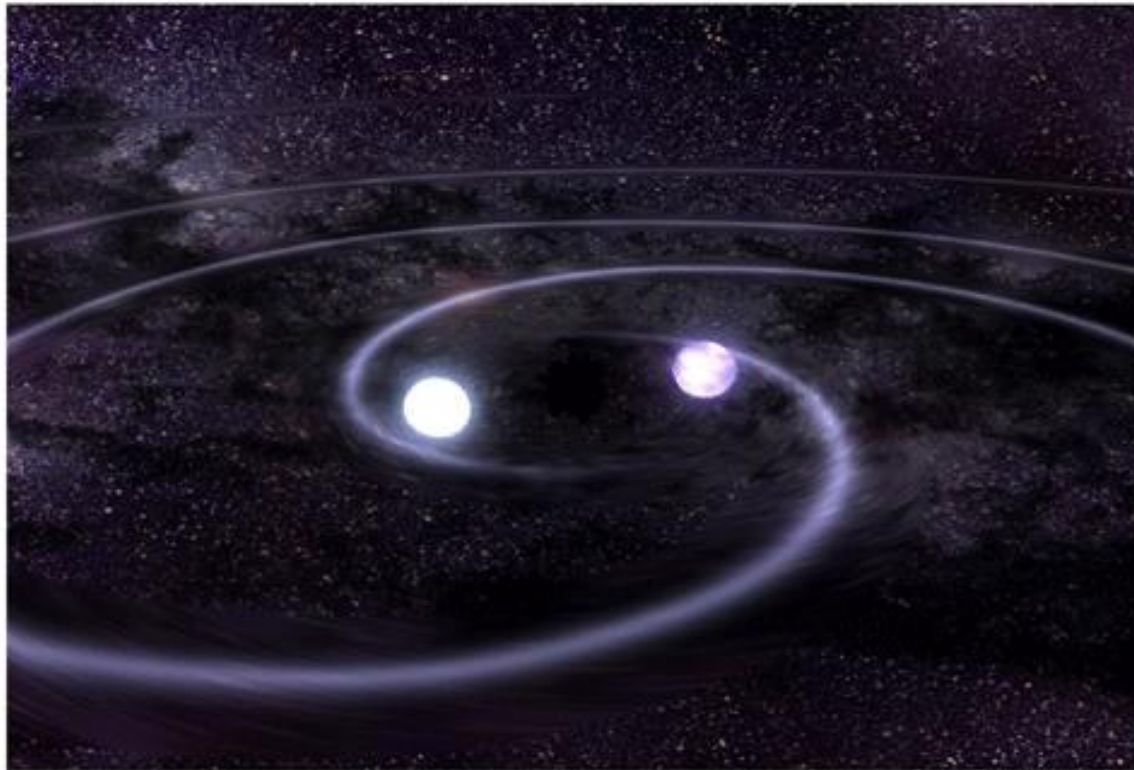


# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok

## Mi az a Gravitációs hullám ?



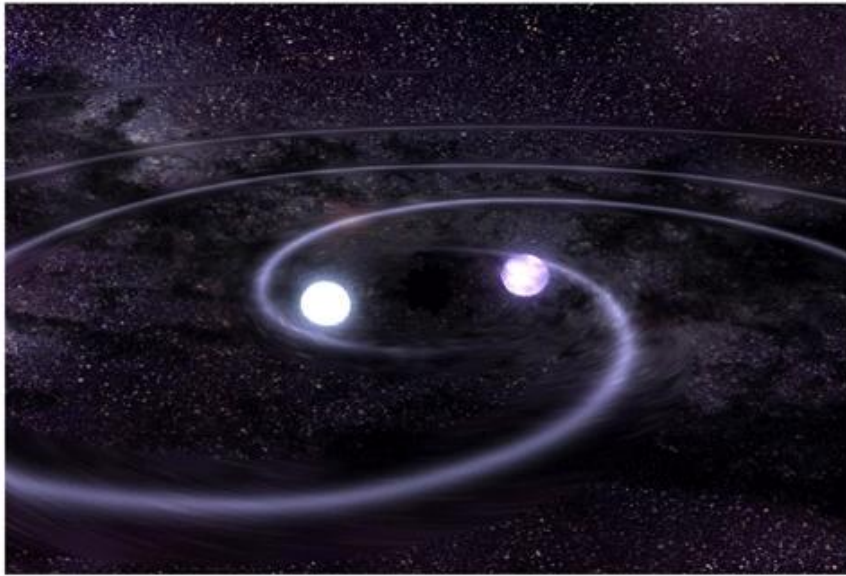
# Bespirálózó kettősök



Egymás körül keringő neutroncsillagok gravitációs hullámokat bocsátanak ki



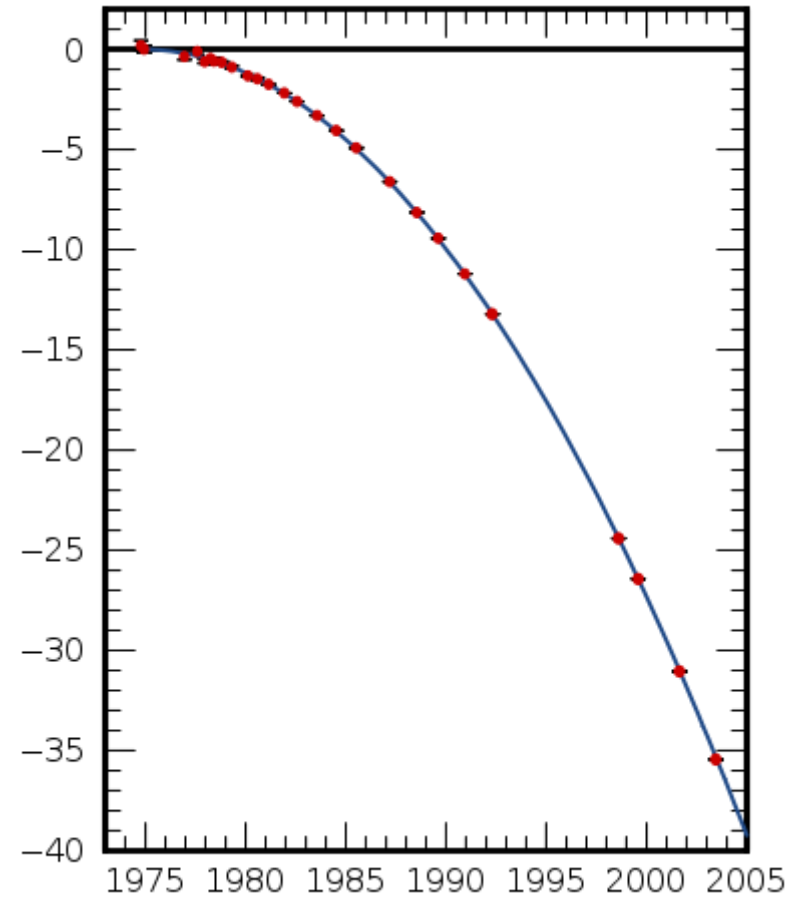
# Bespirálózó kettősök



A kisugárzott energia miatt egyre közelebb kerülnek

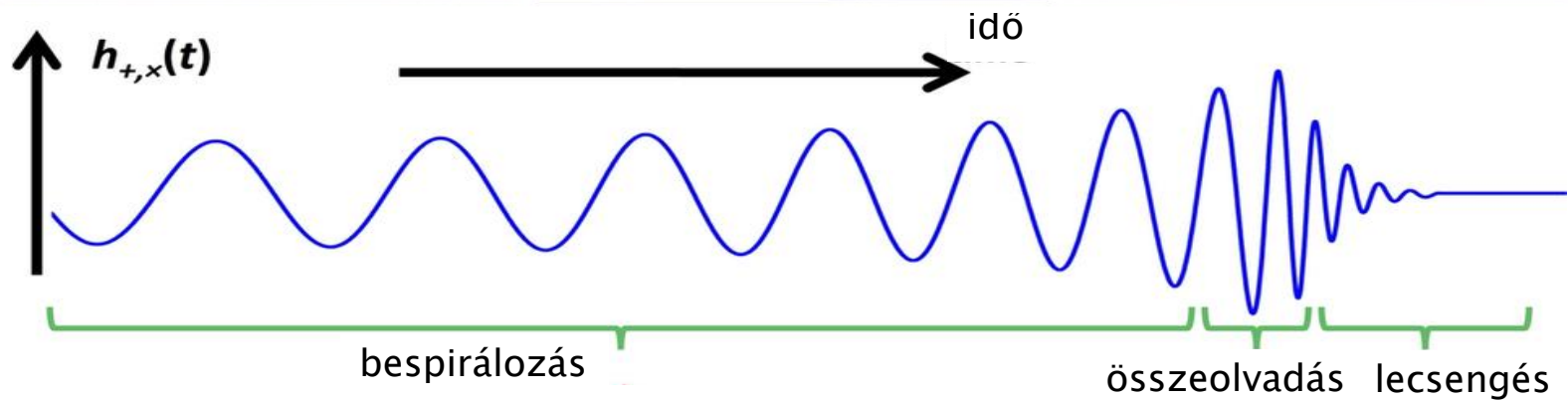
## Taylor–Hulse pulzár:

A keringési idő változik a gravitáció hullámok kibocsájtása miatt



A Taylor–Hulse neutroncsillag kettős pályájának degradációja

# Neutroncsillagok és gravitációs hullámok



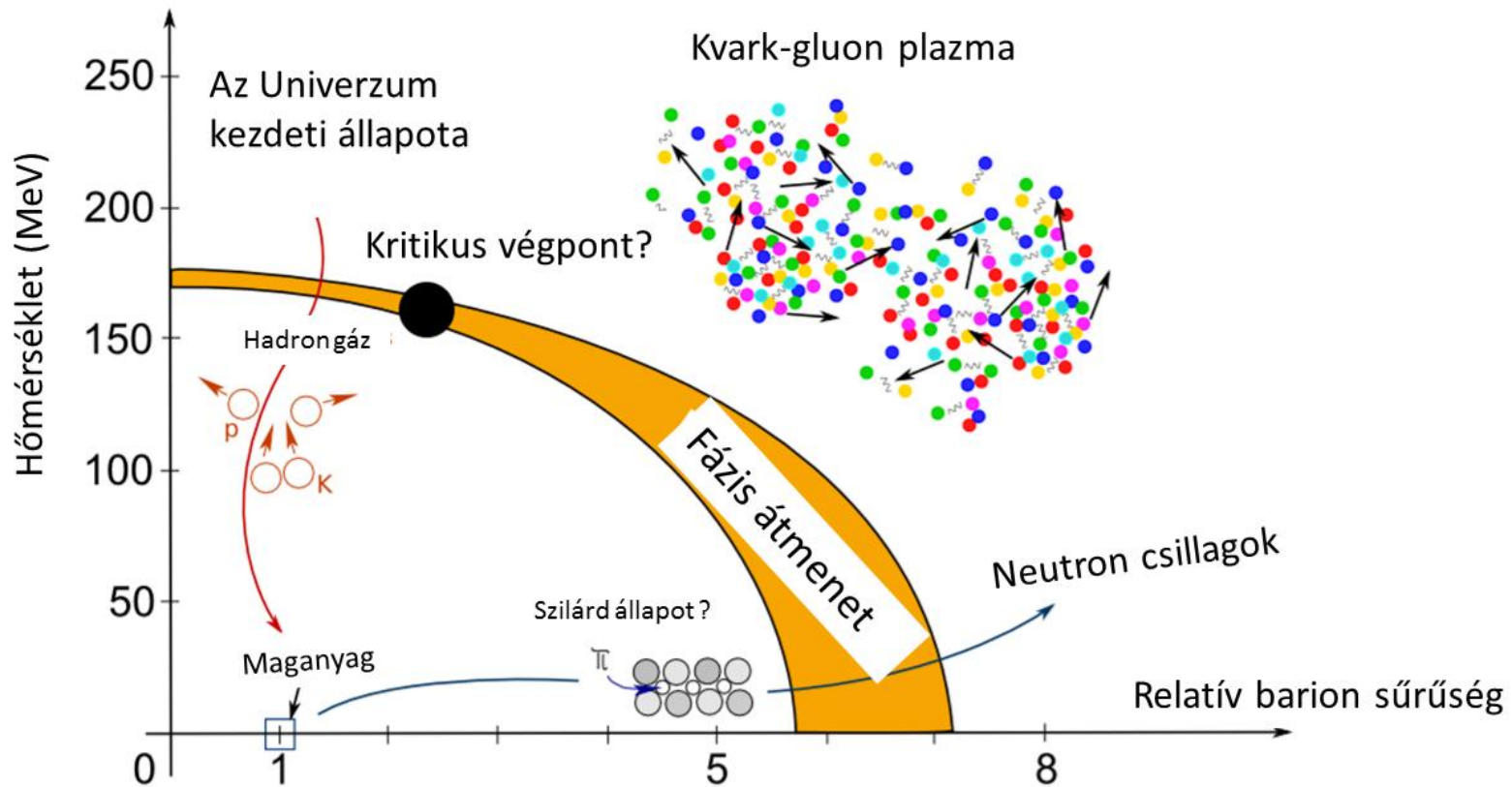
Eddig 5 gravitációs hullámot detektáltak, és a legfrissebb (2017. 08.) neutroncsillagokból származik



# Neutroncsillagok és magfizika



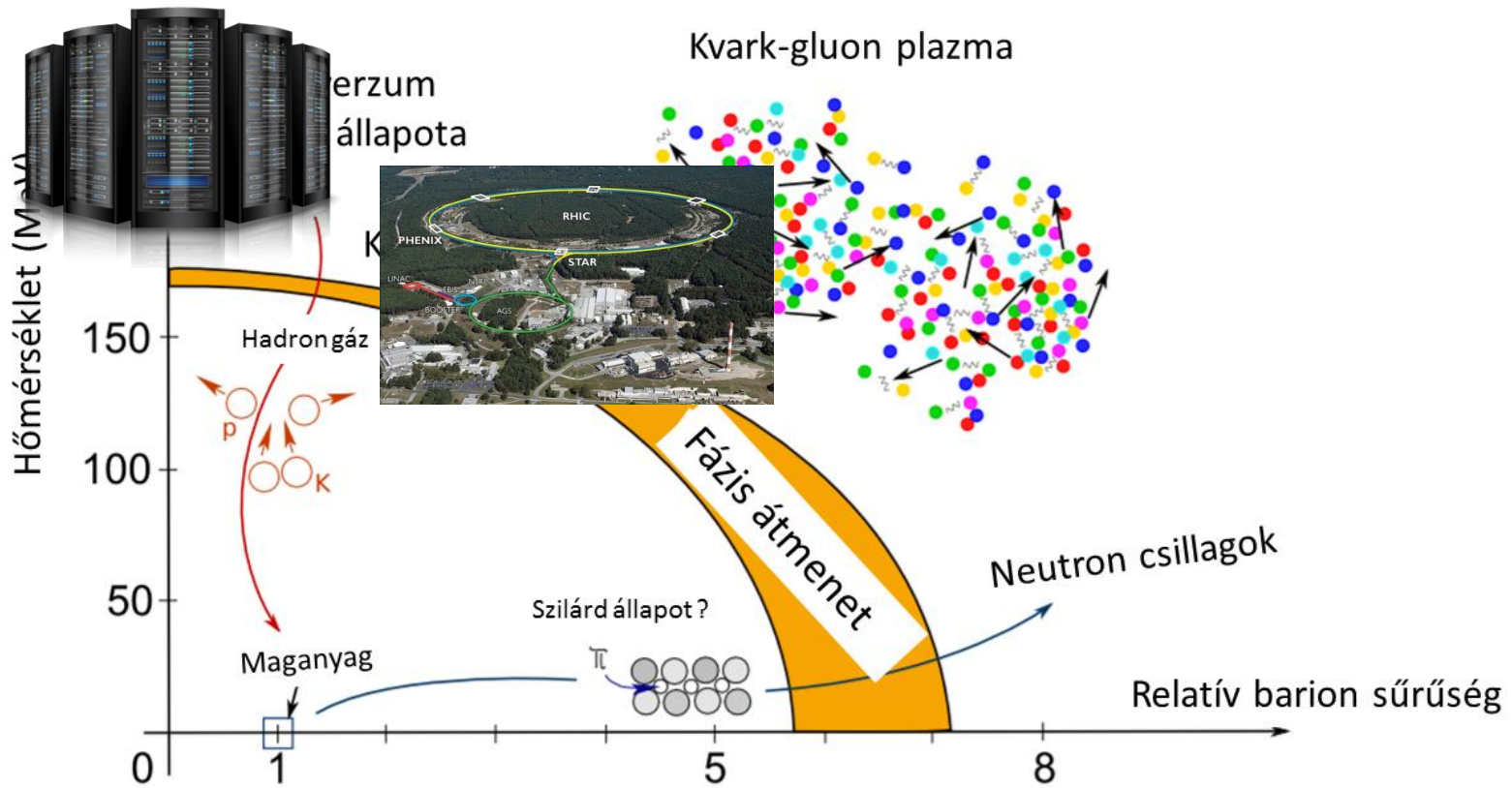
# A magfizika égi laboratóriumi



A maganyag fázisdiagramja: hogyan viselkednek az atommagok extrém körülmények között

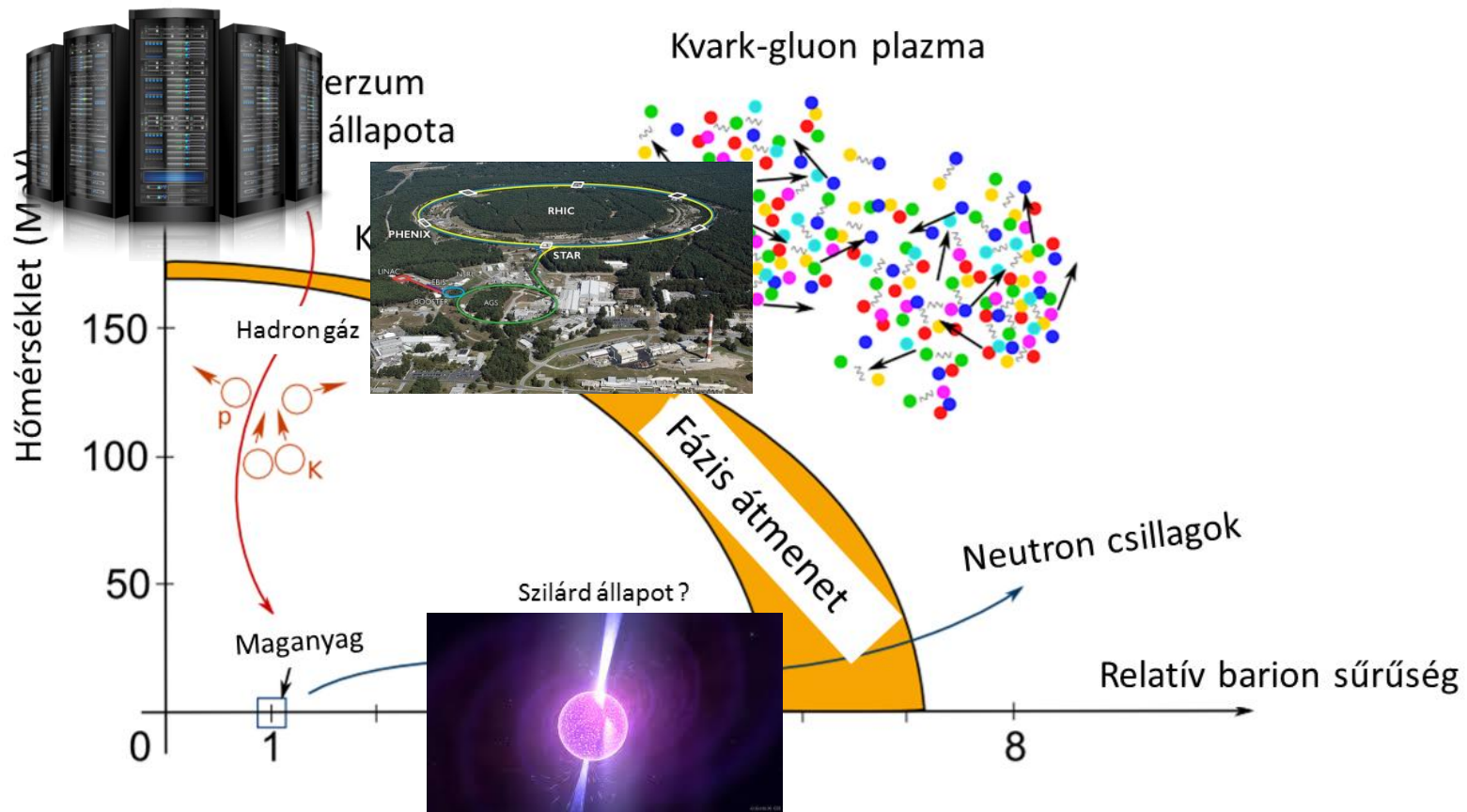


# A magfizika égi laboratóriumi



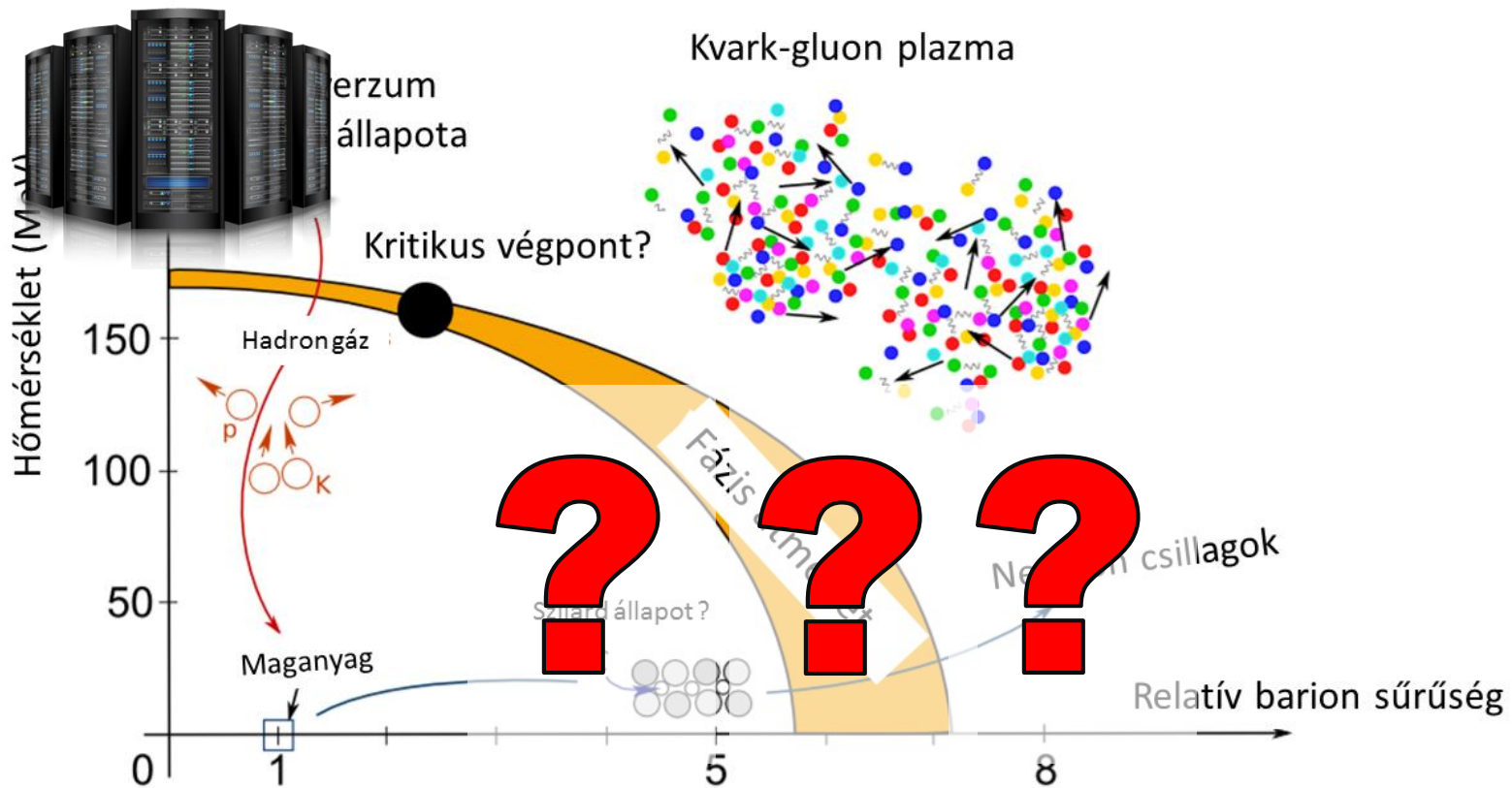
A maganyag fázisdiagramja: hogyan viselkednek az atommagok extrém körülmények között

# A magfizika égi laboratóriumi



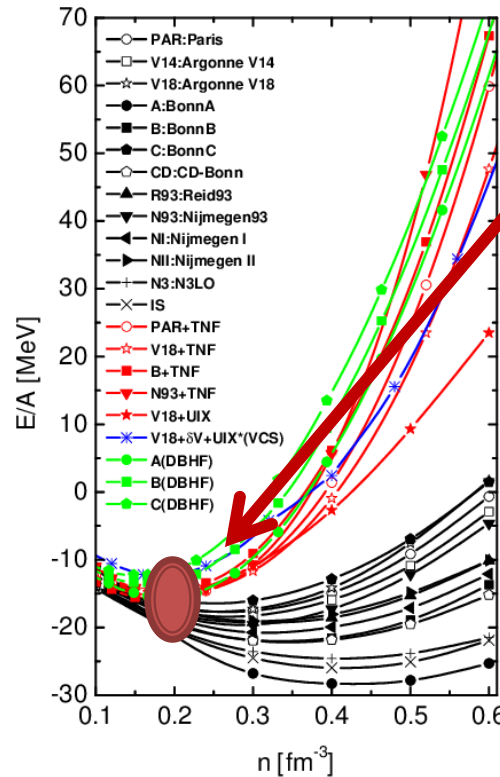
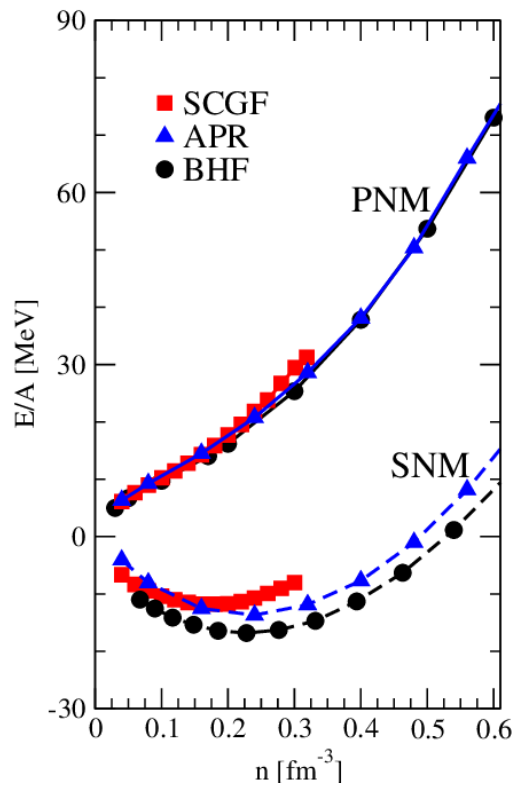
A maganyag fázisdiagramja: hogyan viselkednek az atommagok extrém körülmények között

# A magfizika égi laboratóriumi



A maganyag fázisdiagramja: hogyan viselkednek az atommagok extrém körülmények között

# A maganyag állapotegyenlete



A laborban vizsgálható körülményektől távolodva egyre bizonytalanabbak a jóslatok, mert nem állnak rendelkezésre mérések



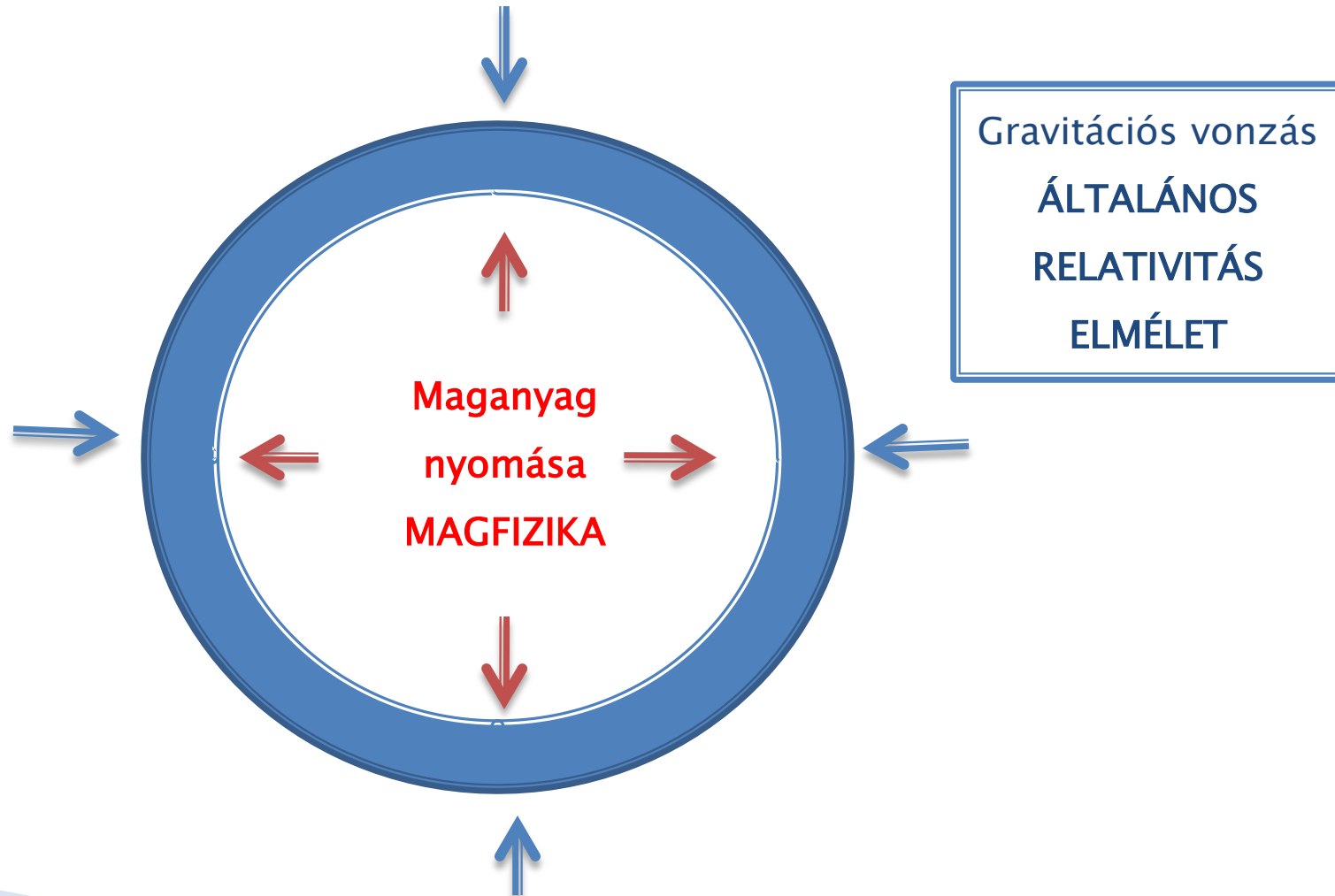
Több ezer lehetséges állapotegyenlet van forgalomban!

Leírja a maganyag viselkedését: nyomását, hőmérsékletét, sűrűségét, energiáját, összetételét

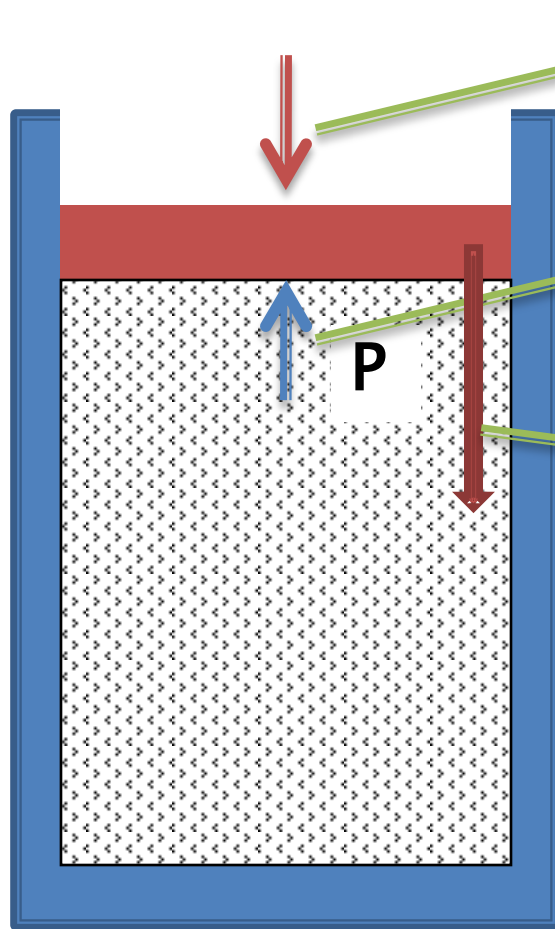


# A magfizika és a neutroncsillagok kapcsolata

Hidrosztatikai egyensúly neutroncsillagokra



# Hidrosztatikai egyensúly–analógia



nyomóerő

Felsőbb rétegek nyomása a csillagban – gravitáció

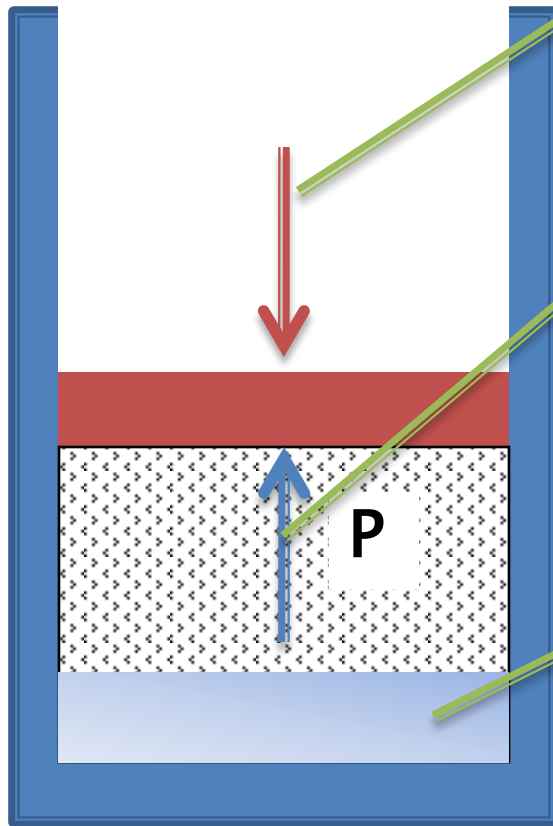
Vízgőz nyomása

Maganyag nyomása

Lefelé mozgó dugattyú  
-> nagyobb nyomóerő

A csillagban mélyebben nagyobb a nyomás, mert egyre több felső réteg súlyát kell megtartani.

# Hidrosztatikai egyensúly–analógia



nyomóerő  $N\ddot{O}$

Egyre mélyebbre haladva a csillagban a egyre több anyagot kell megtartani

Vízgőz nyomása  $N\ddot{O}$

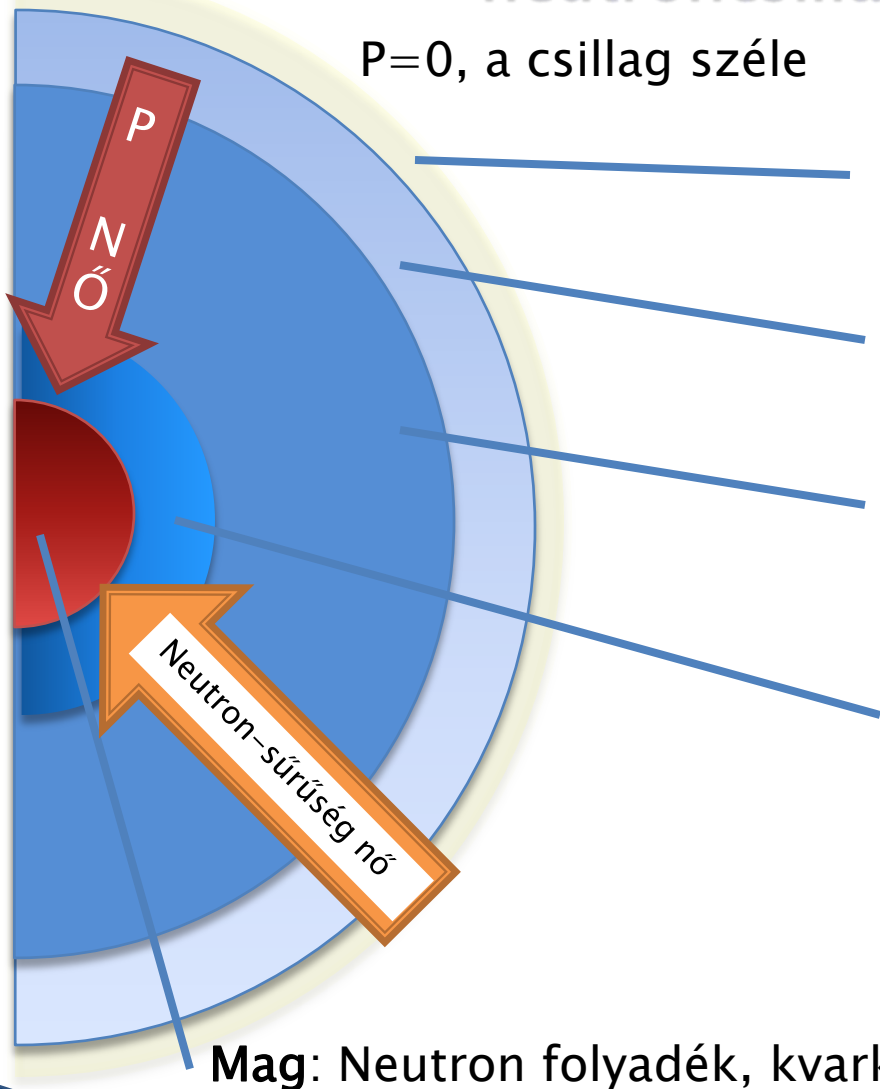
Kisebb térfogatra összenyomva a gőz nyomása nő

## Fázisátalakulás

Kicsapódó vízpára: a nagy nyomás hatására a gőz vízzé alakul, hiszen az kisebb térfogatot foglal

A csillagban az atomok neutron rácscá alakulnak, mert az „kisebb helyen is elfér”

# A hidrosztatikai egyensúly következménye: a neutroncsillag szerkezete

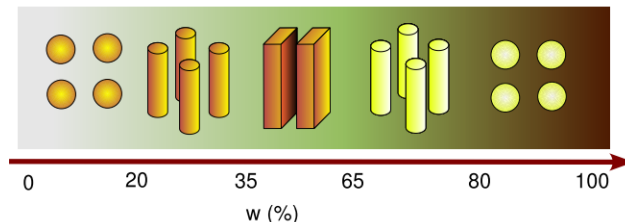


**Csillaglégkör:** Hidrogén, Hélium, könnyű elemek

**Kéreg:** Nehéz elemek rácsban, Vas, Nikkel

**Belső kéreg:** Neutron gáz, nagy neutron tartalmú izotópok

**Palást:** **Spagettizáció**  
Az atommagok átrendeződnek, hogy minél kevesebb helyet foglaljanak, minél alacsonyabb energiájú állapotba kerüljenek





# Hogyan következtethetünk magfizikából a neutroncsillagok tulajdonságaira?

Milyen nyomáson hogyan viselkedik az anyag?

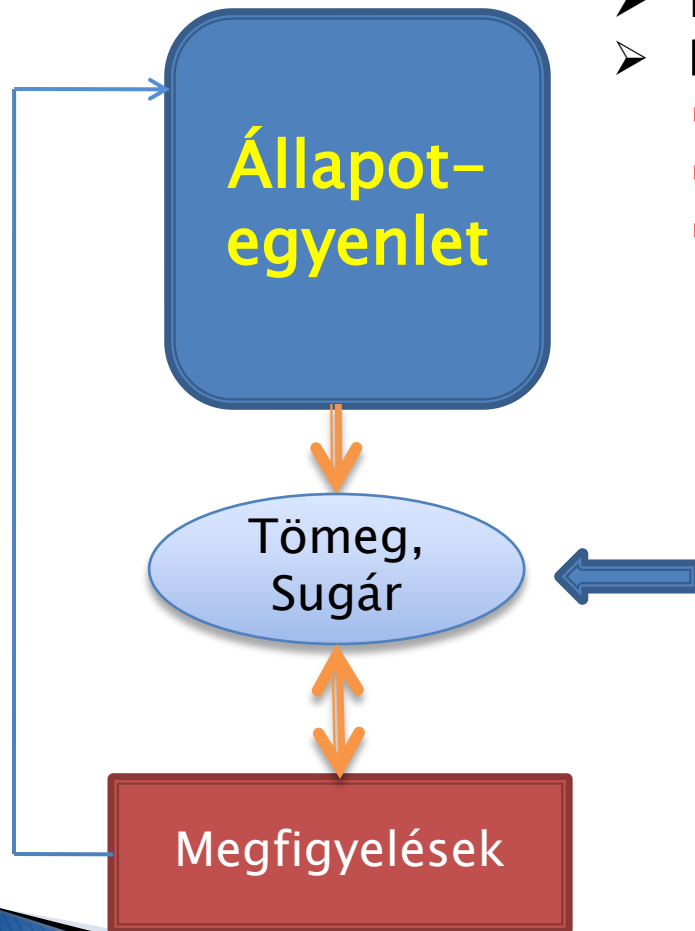
- Energia, sűrűség
- Fázisátalakulások
  - **Neutron kiválás**: neutron gáz keletkezése
  - **Spagettizáció**
  - **Olvasás**: Neutron folyadék



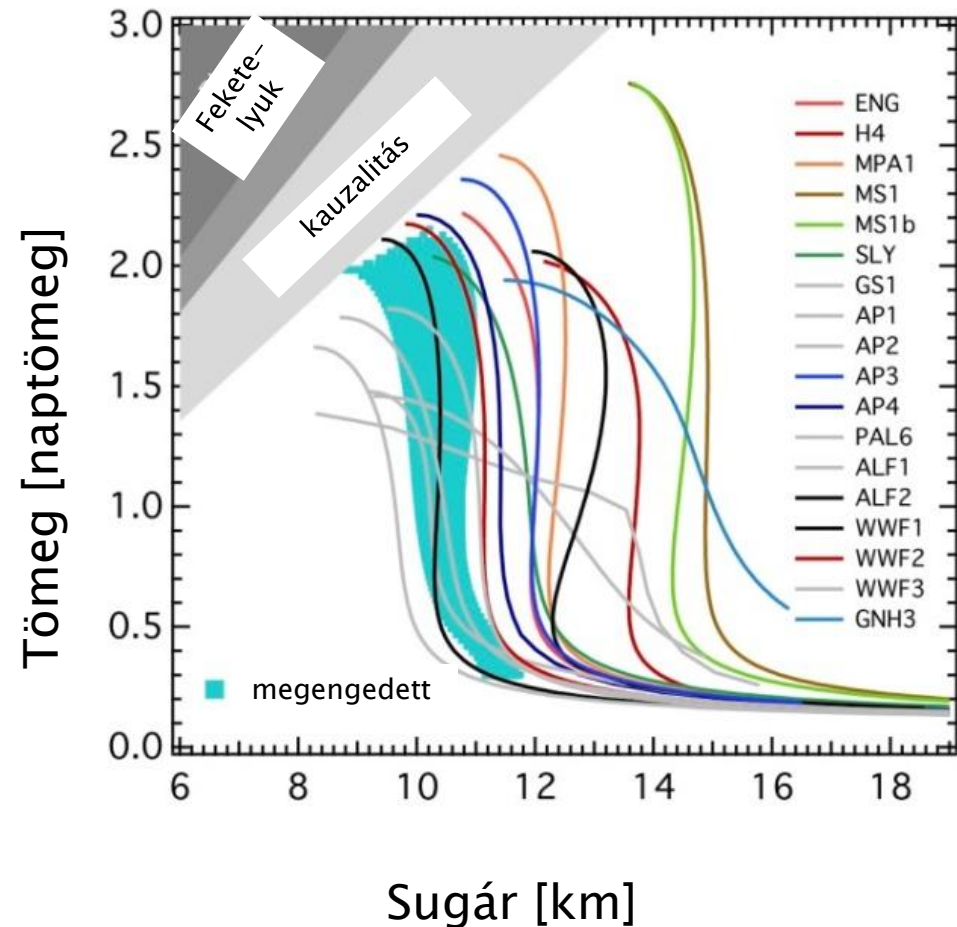
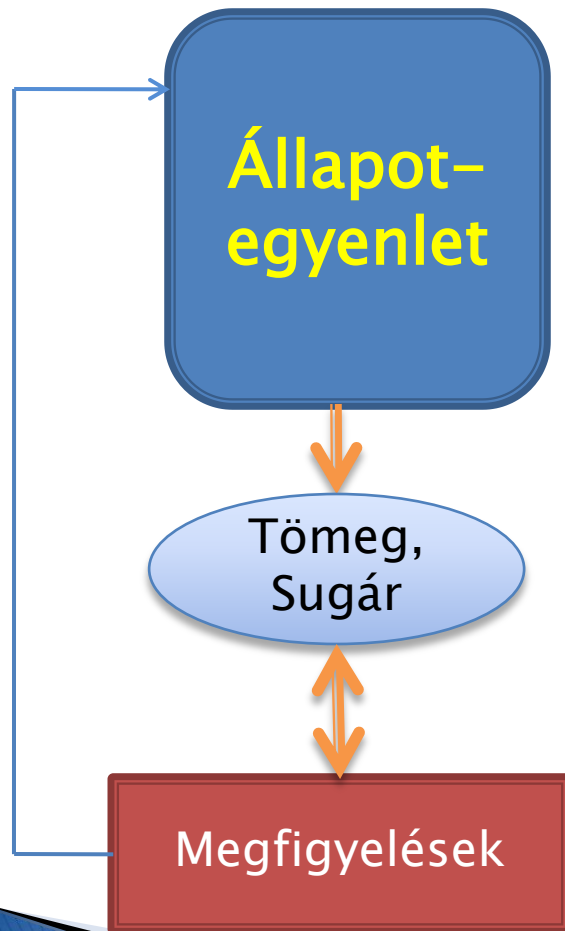
Meghatározza a:

- Kéreg
- Köpeny
- Palást

Helyét és vastagságát

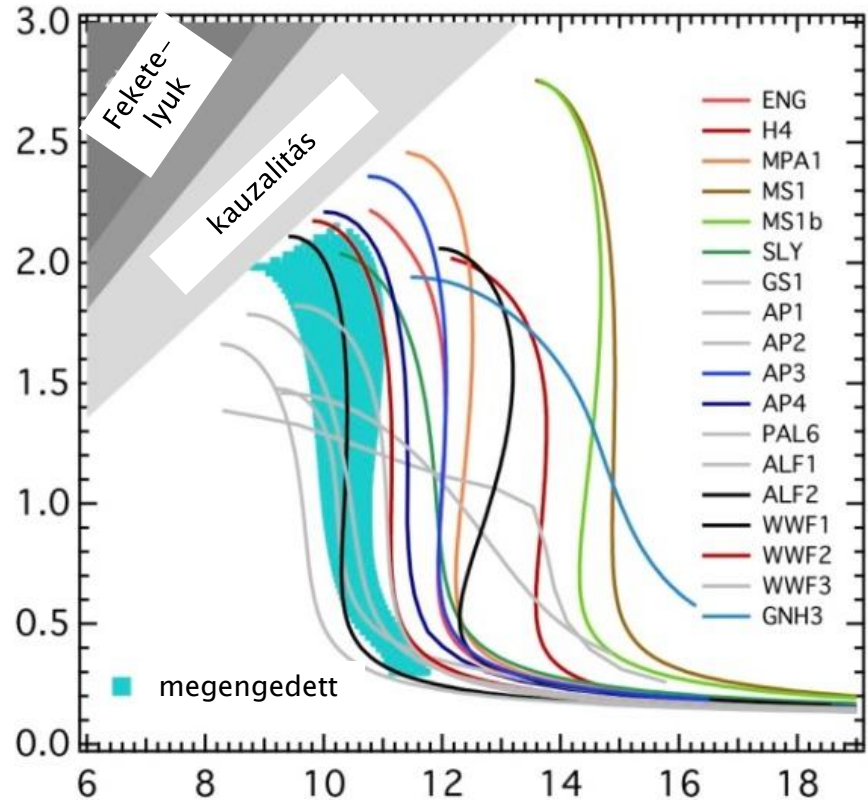
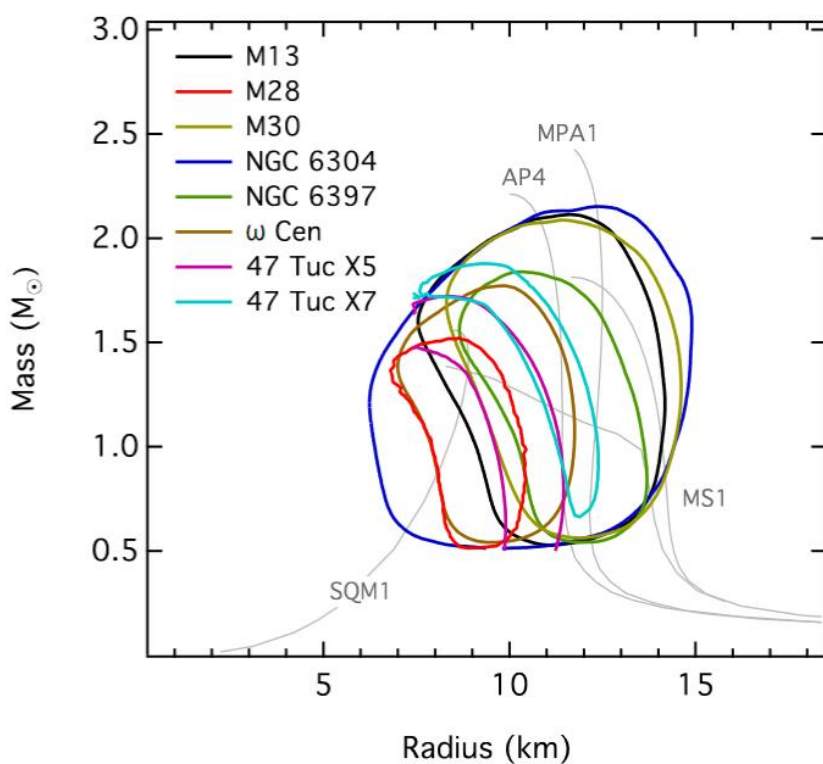


# Hogyan következtethetünk magfizikából a neutroncsillagok tulajdonságaira?



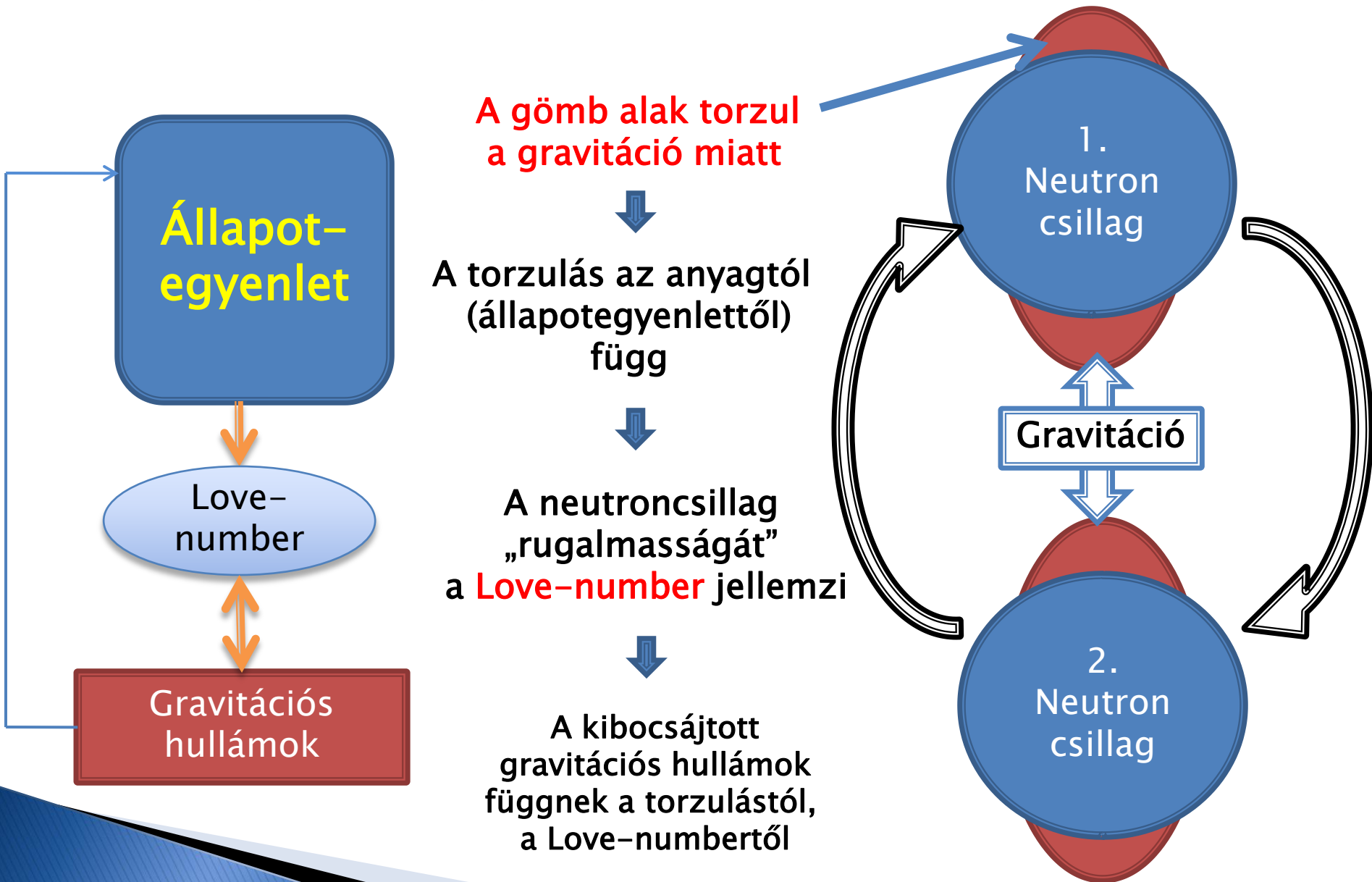
# Hogyan következtethetünk magfizikából a neutroncsillagok tulajdonságaira?

Az M–R diagram jelenleg nem ismert nagy pontossággal



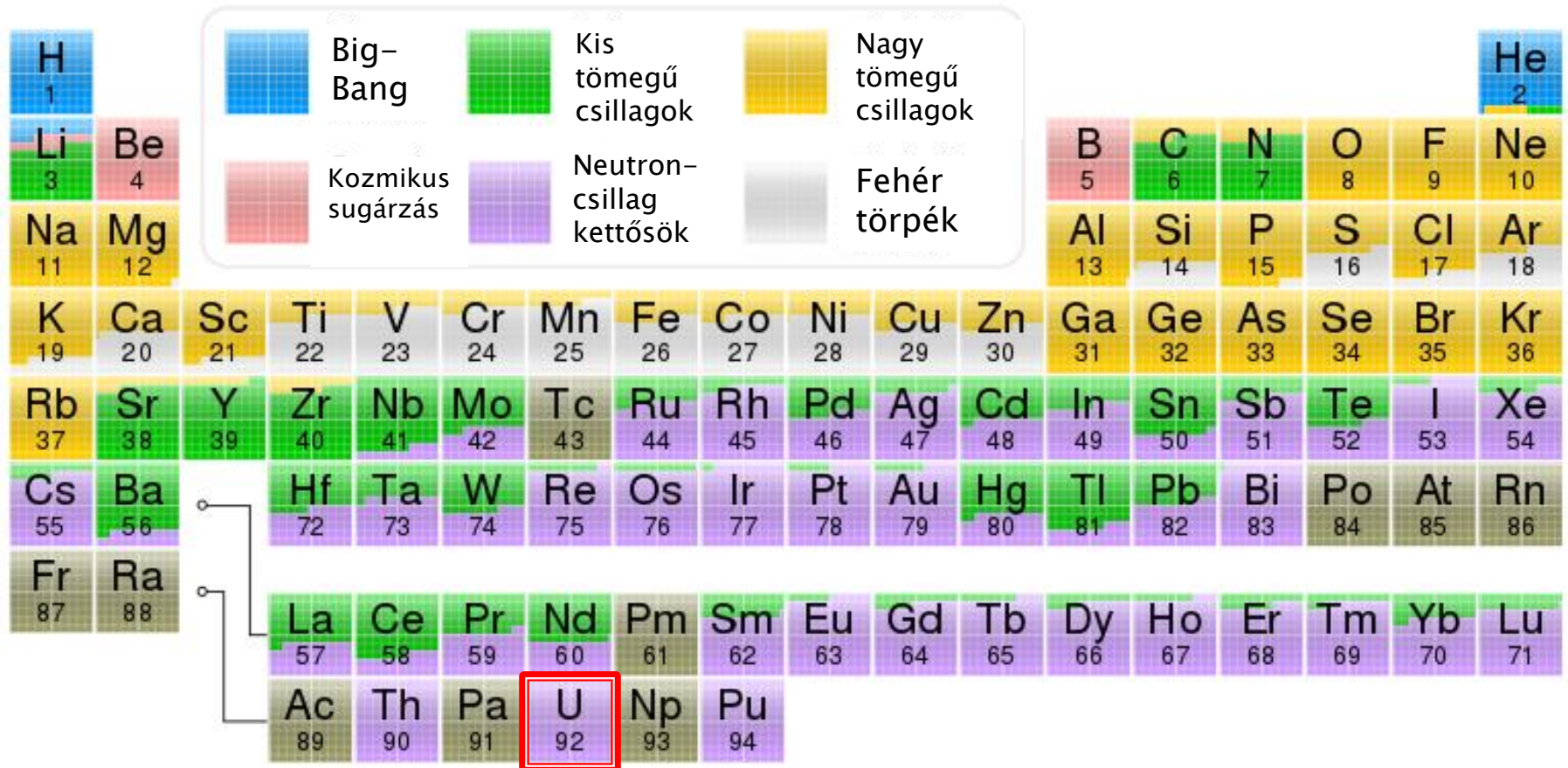
Sugár [km]

# Magfizika gravitációs hullámokkal?

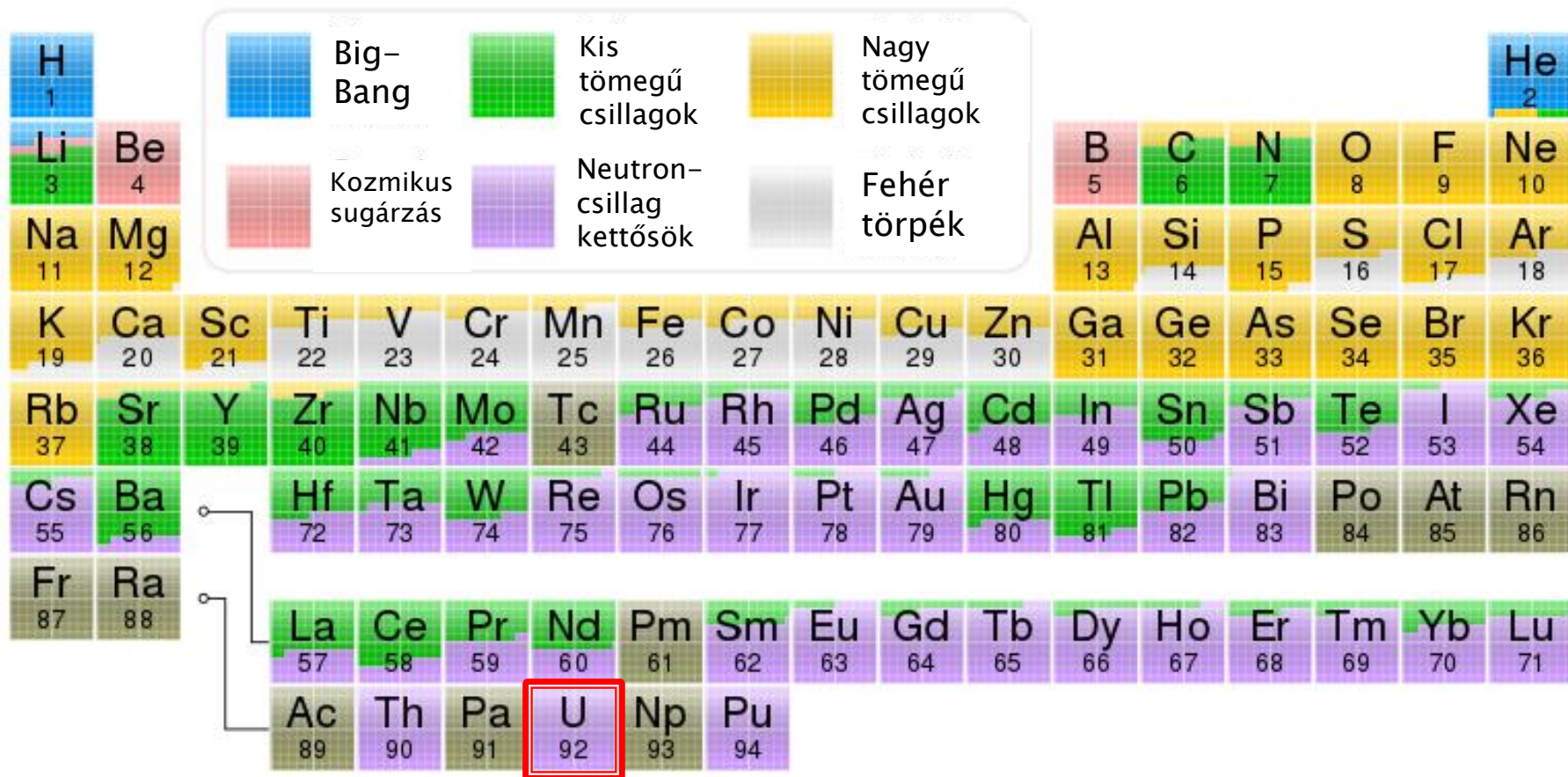




# Nukleoszintézis és a neutroncsillagok



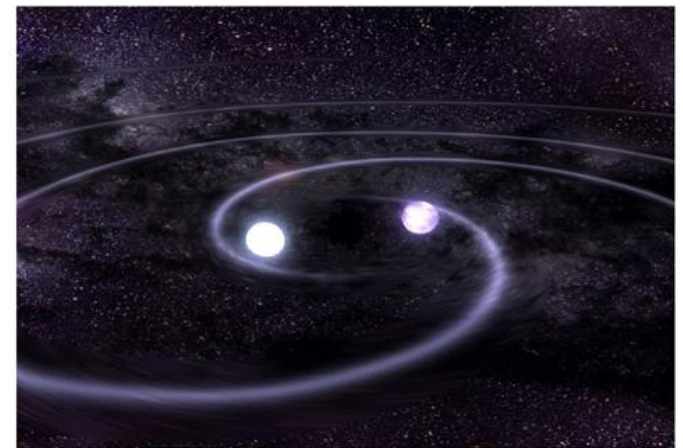
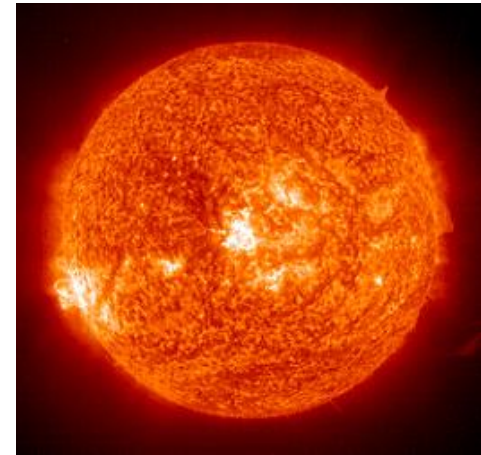
# Nukleoszintézis és a neutroncsillagok



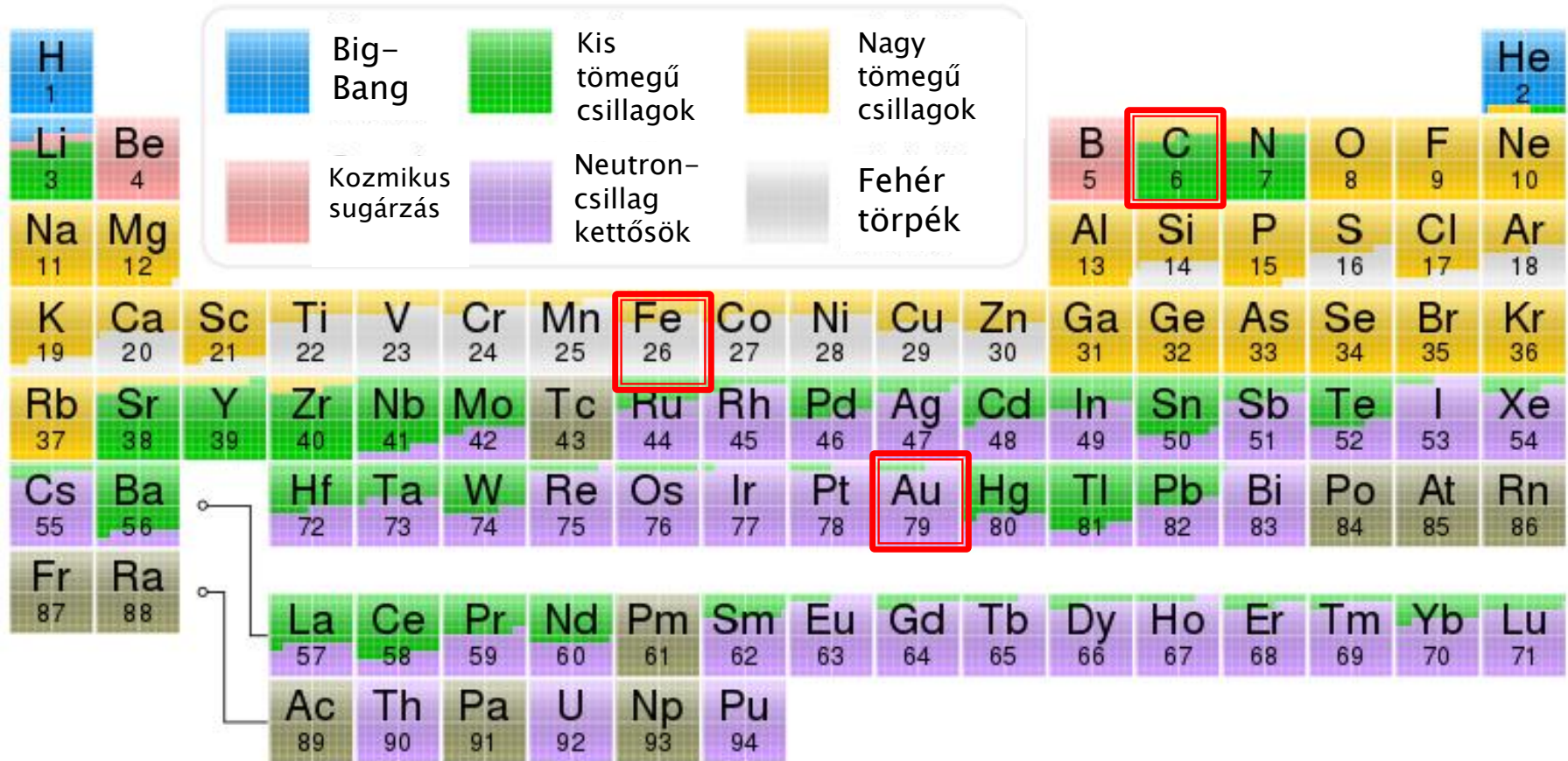


# Minden energia végső soron gravitációs energia

- ▶ Szél – nap hője
- ▶ Árapály erőmű – gravitáció
- ▶ napenergia – nap sugárzás
- ▶ Fosszilis – növények – napenergia
- ▶ Atomenergia – szupernova, NCS kettősök
  
- ▶ Fúziós???



# Honnan származnak a minket körülvevő anyagok?





# Kérdezzenek bátran!

További érdekességek a ingyenes online jegyzetemben

<http://pospet.web.elte.hu/>

[http://pospet.web.elte.hu/Bevezetes\\_a\\_modern\\_fizikaba\\_v069.pdf](http://pospet.web.elte.hu/Bevezetes_a_modern_fizikaba_v069.pdf)

## *Köszönetkinyilvánítás:*

A szerzők köszönetüket szeretnék kifejezni az NKFIH OTKA K120660, K104292, K104260 pályázatoknak, valamint az MTA NKM-81/2016 MTA-UA bilaterál mobilitási programnak. BGG és PP köszönettel tartozik a NewCompStar (MP1304) és THOR (CA15213) COST akciópályázatok nyújtotta támogatásért.

Ábrák forrásai :

<https://apatruno.wordpress.com/neutron-stars/>

[http://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/archive/EducationResource/Universe/framed\\_e/lecture/ch16/ch16.html](http://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/archive/EducationResource/Universe/framed_e/lecture/ch16/ch16.html)

[https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/23oct\\_superstorm](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/23oct_superstorm)

<https://www.universetoday.com/65353/what-is-the-coldest-planet-of-our-solar-system/>