

# A kvarkoktól az atomerőműig – kirándulás a nukleáris völgybe



Az atomoktól a csillagokig

Dávid Gyula

2011. 09. 29.

# 100 éves az atommag



## 100 éves az atommag



**Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)**

**100 éves az atommag**

az atom pudingmodellje



**Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)**

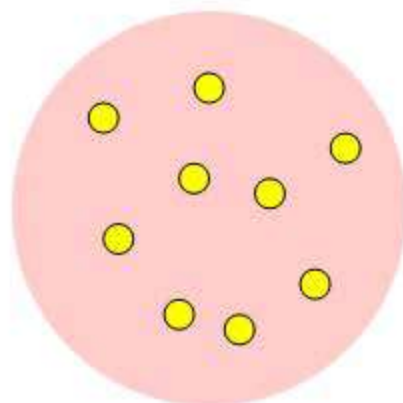


## 100 éves az atommag



**Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)**

az atom pudingmodellje

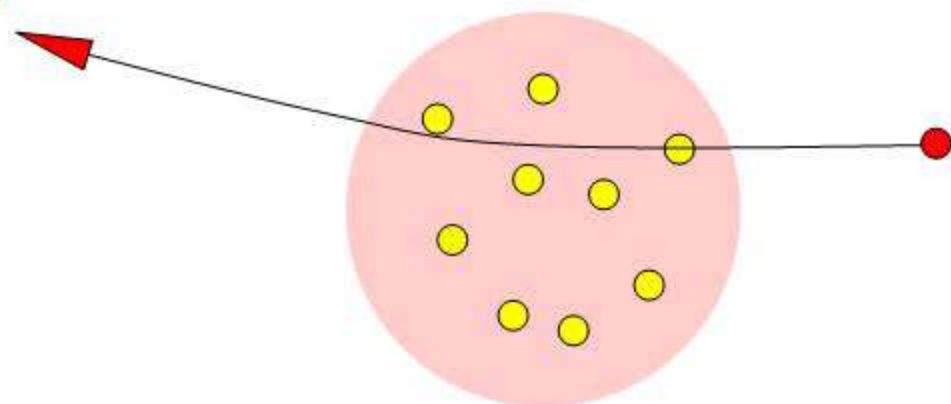


100 éves az atommag



Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)

az atom pudingmodellje

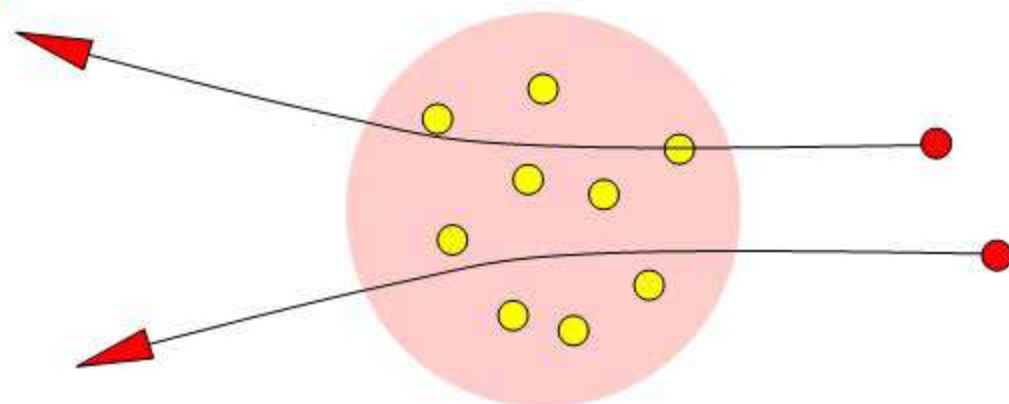


# 100 éves az atommag



**Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)**

az atom pudingmodellje

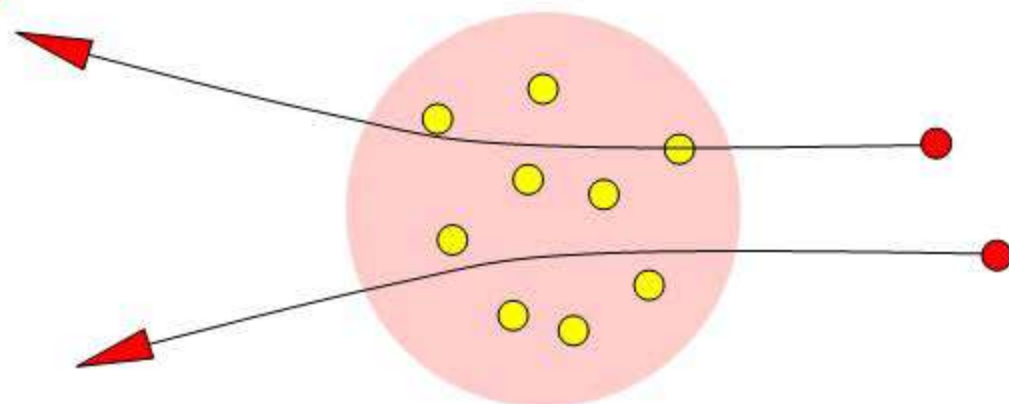


# 100 éves az atommag



**Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)**

az atom pudingmodellje



Rutherford Naprendszer-modellje



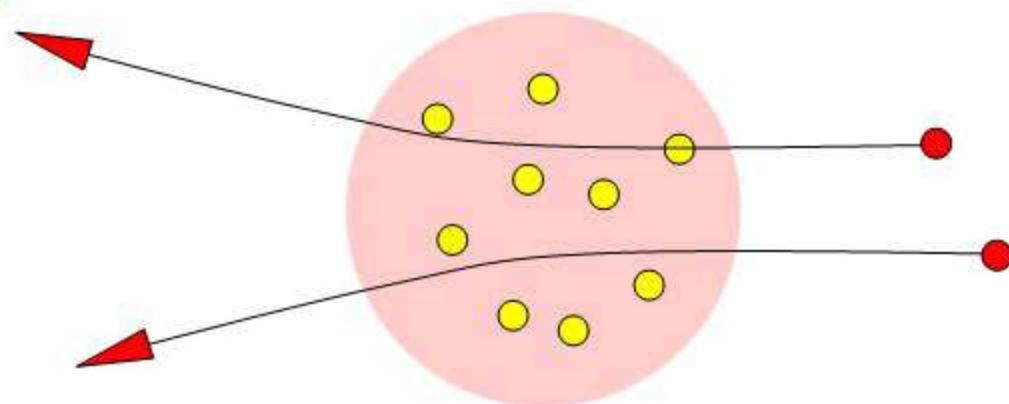


# 100 éves az atommag

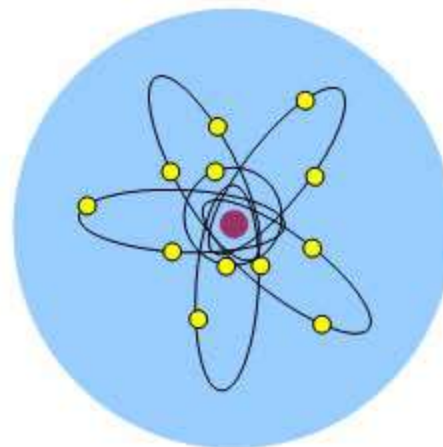


**Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)**

az atom pudingmodellje



Rutherford Naprendszer-modellje

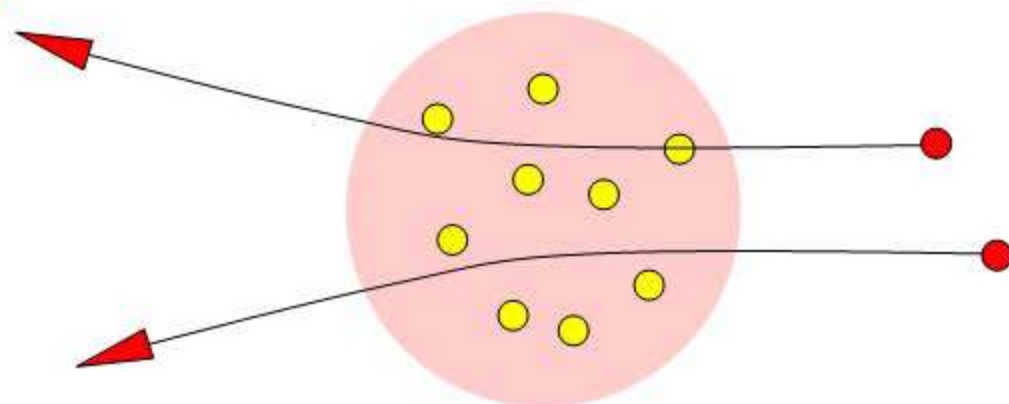


# 100 éves az atommag

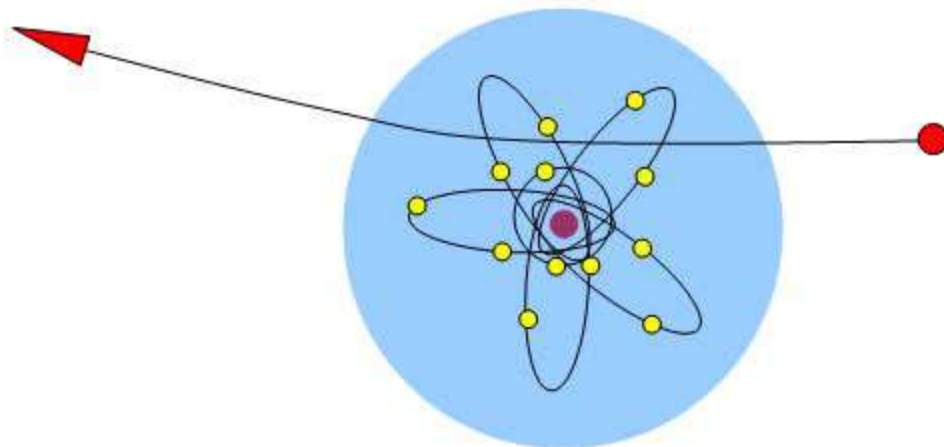


**Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)**

az atom pudingmodellje



Rutherford Naprendszer-modellje

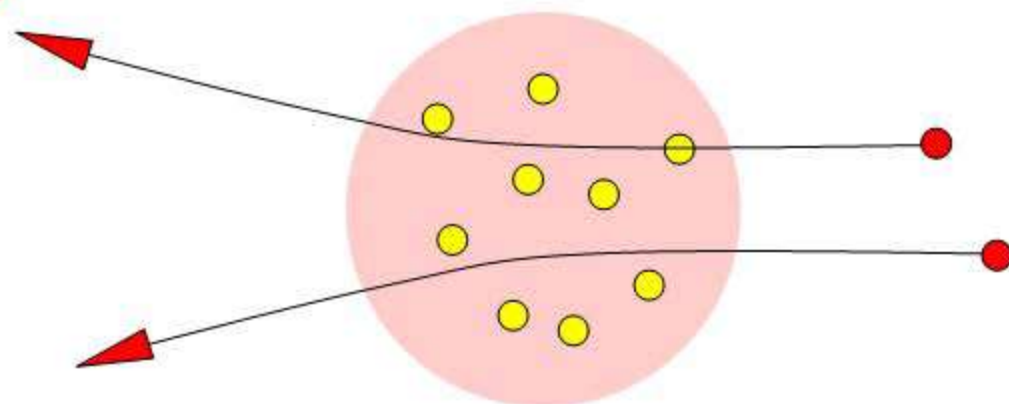


# 100 éves az atommag

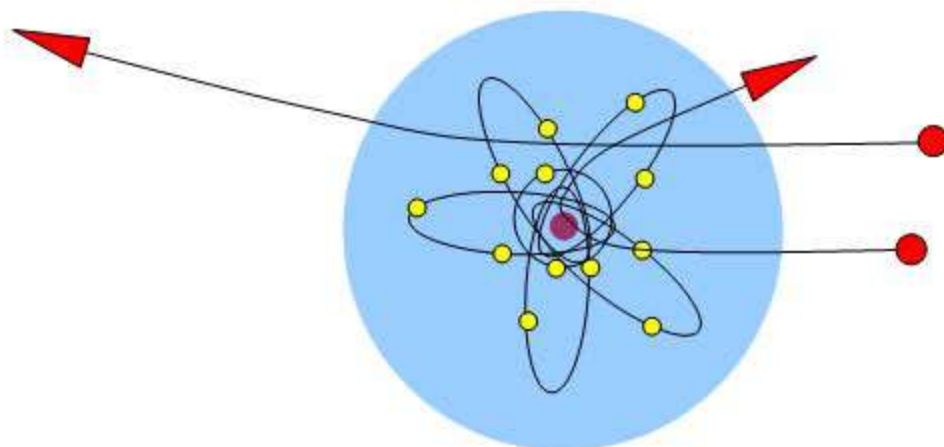


**Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)**

az atom pudingmodellje



Rutherford Naprendszer-modellje

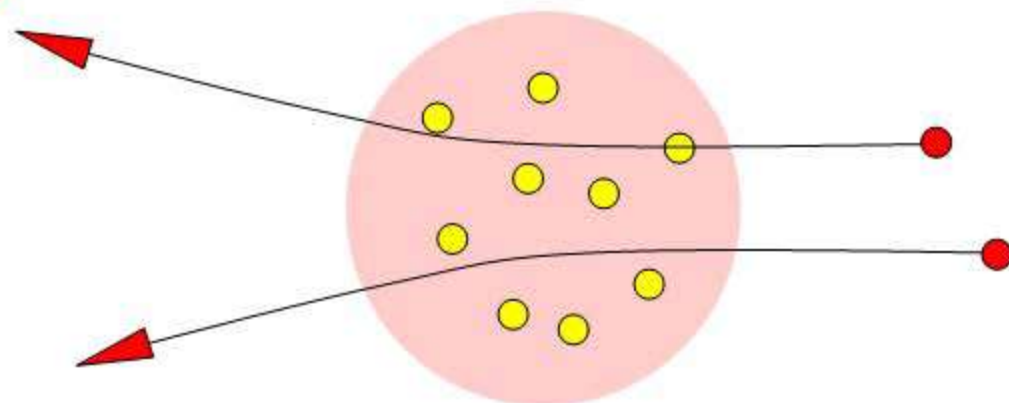


# 100 éves az atommag

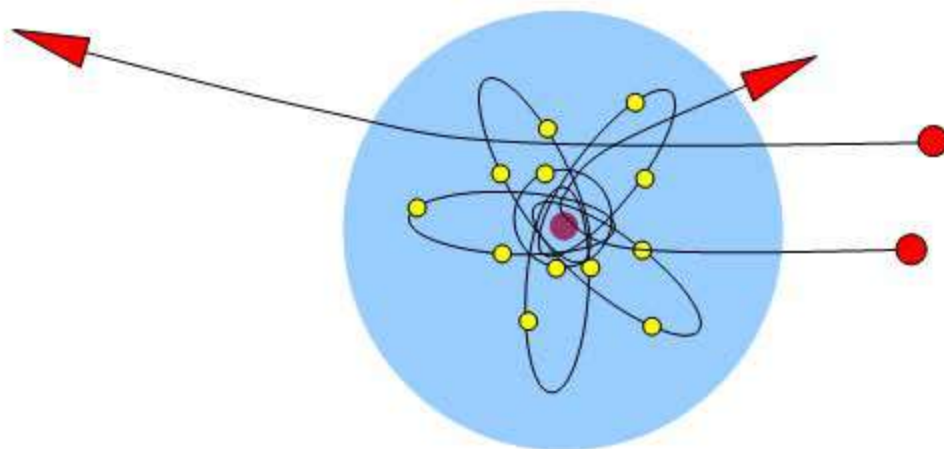


Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)

az atom pudingmodellje



Rutherford Naprendszer-modellje



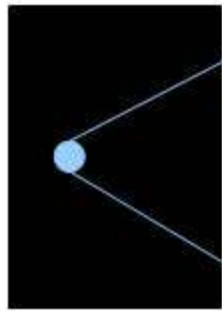
**az atommag százezerszer kisebb az atomnál!**



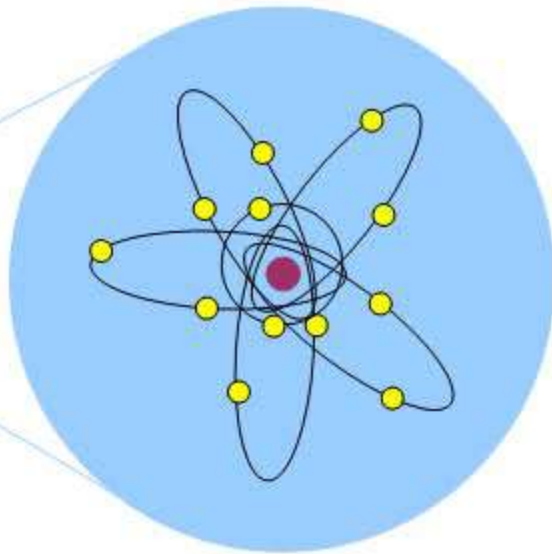


anyag



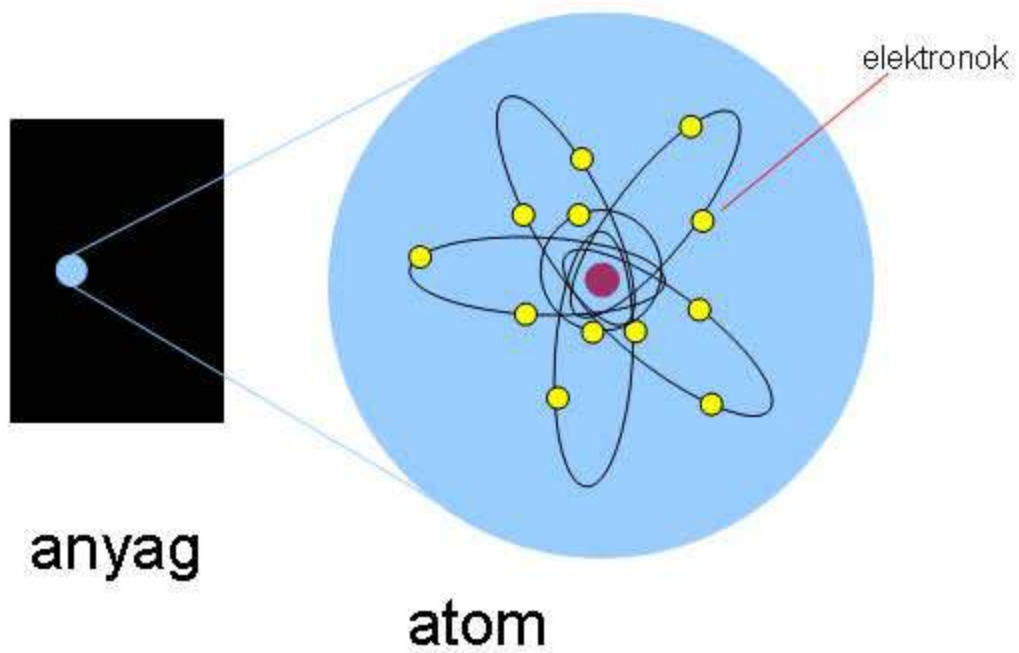


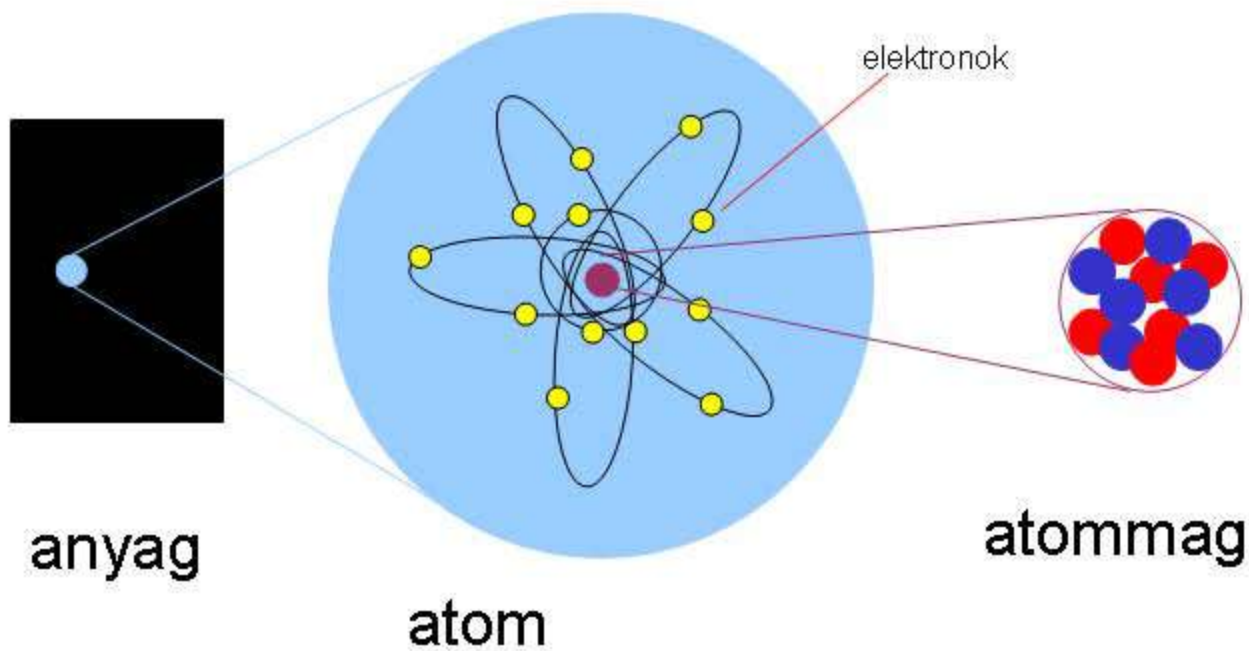
anyag



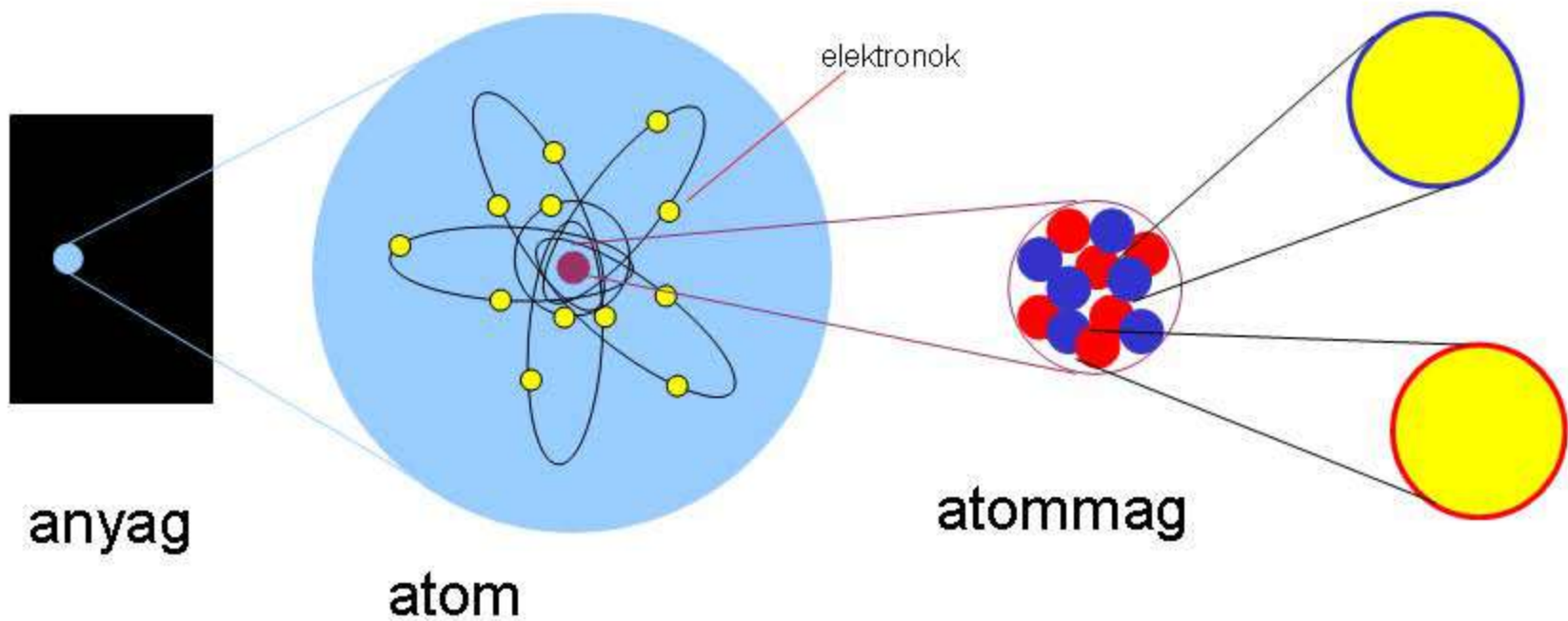
atom

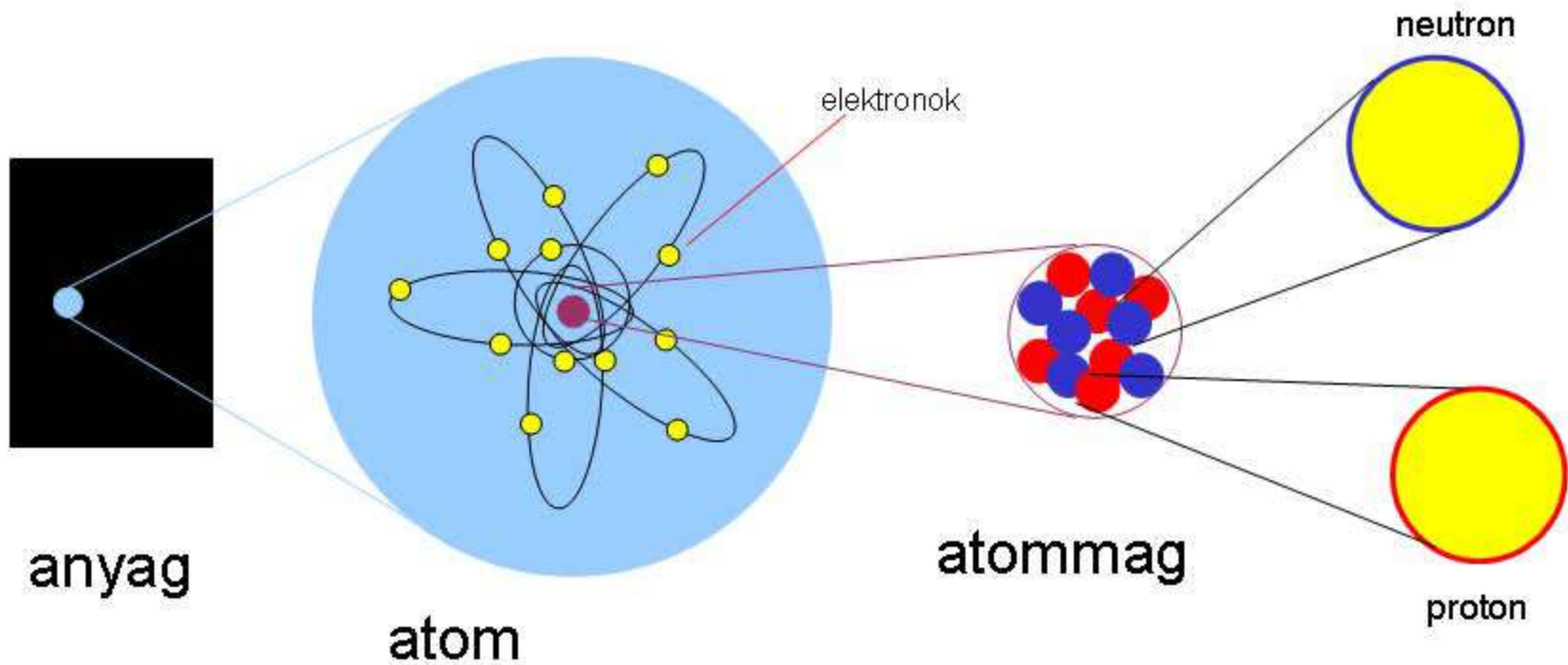


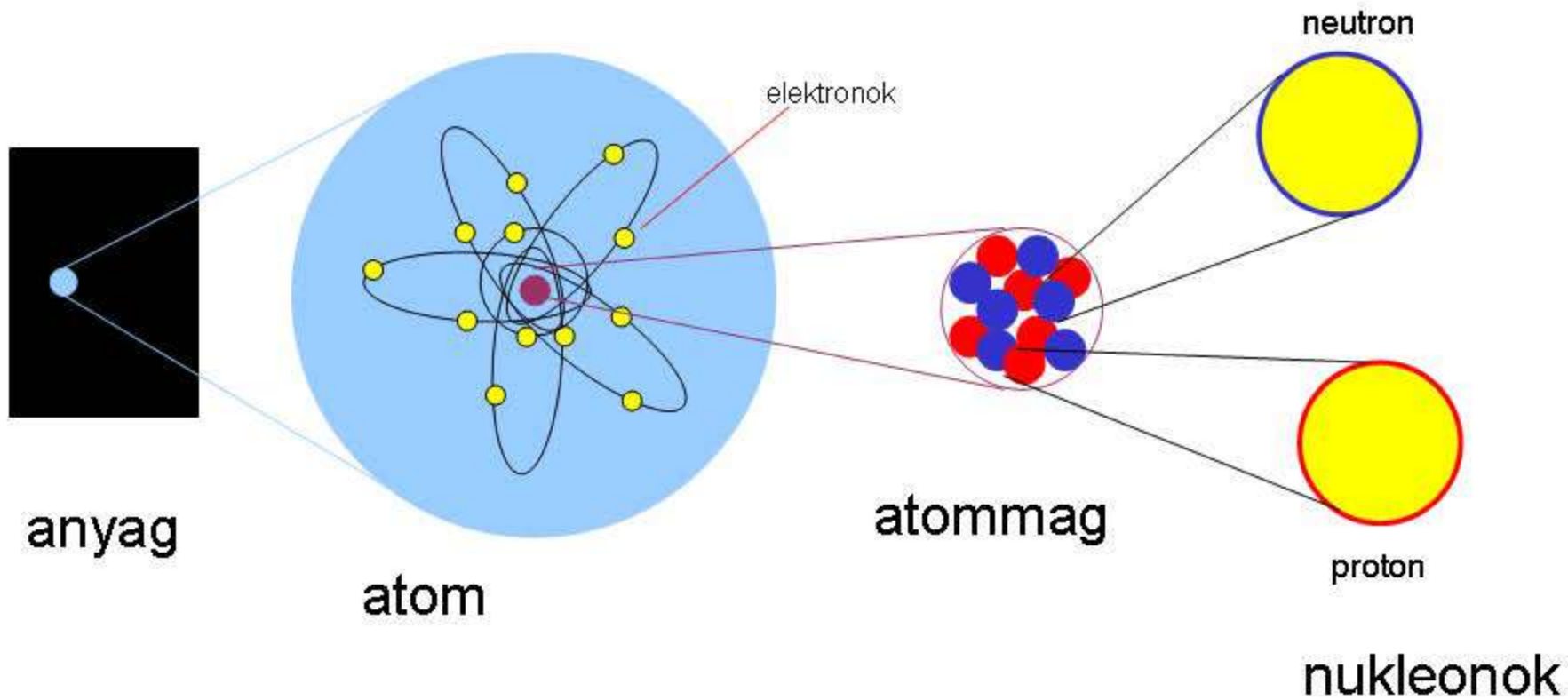


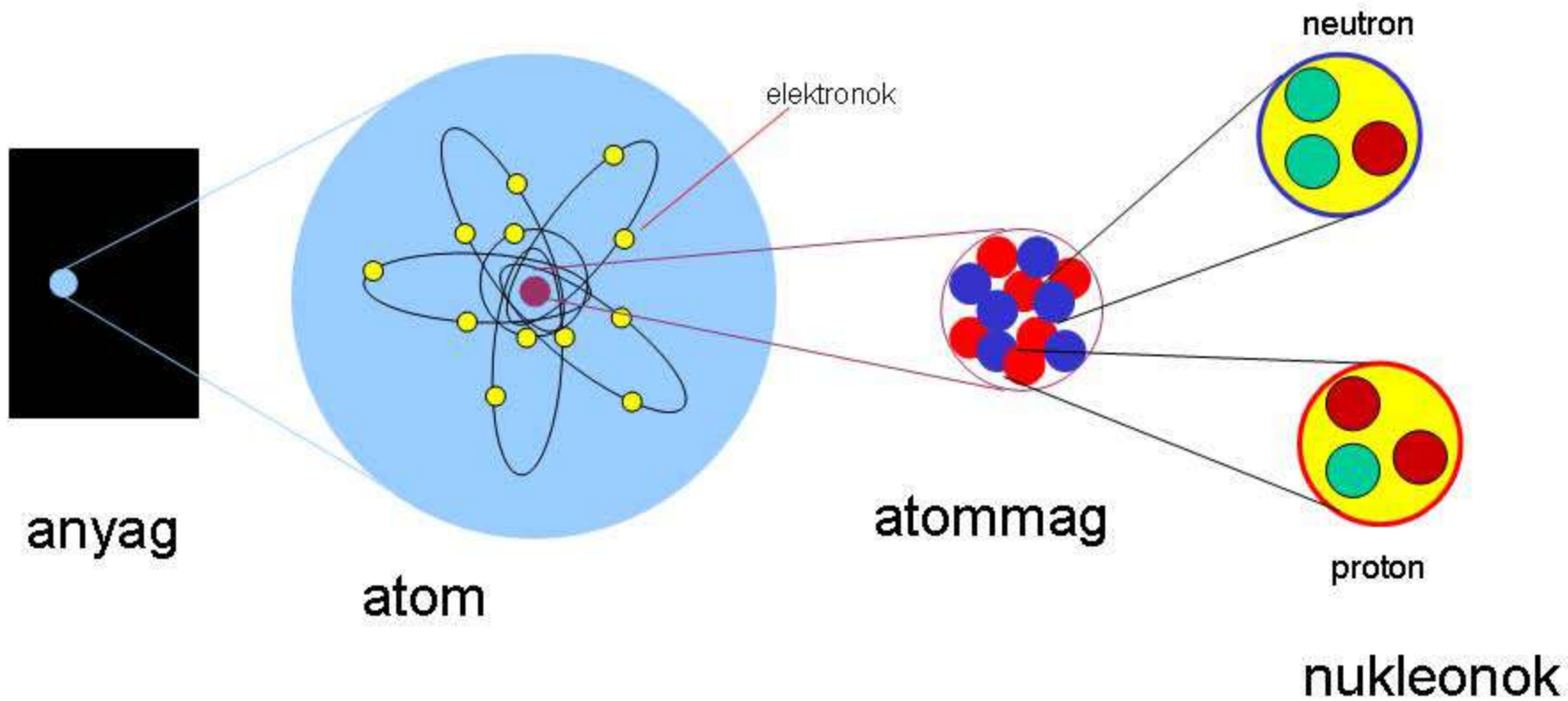


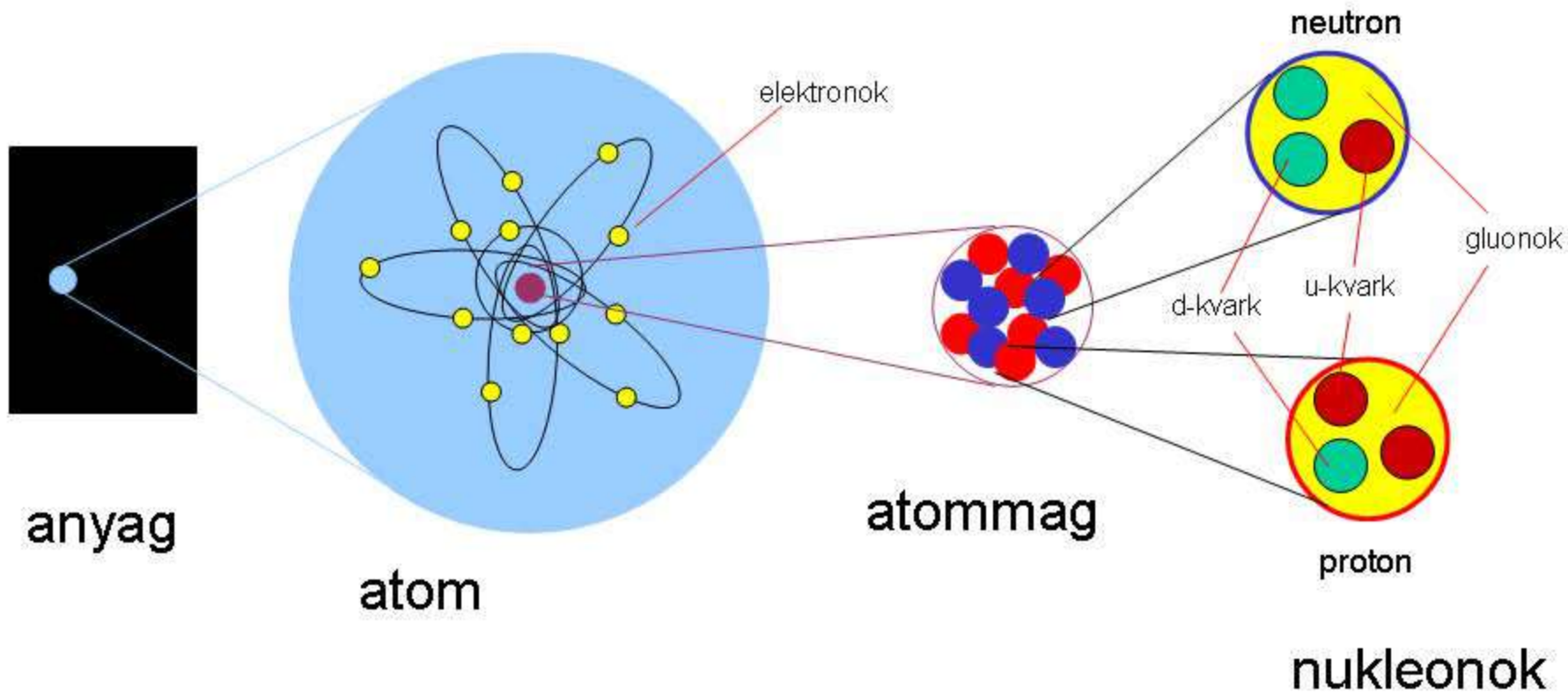


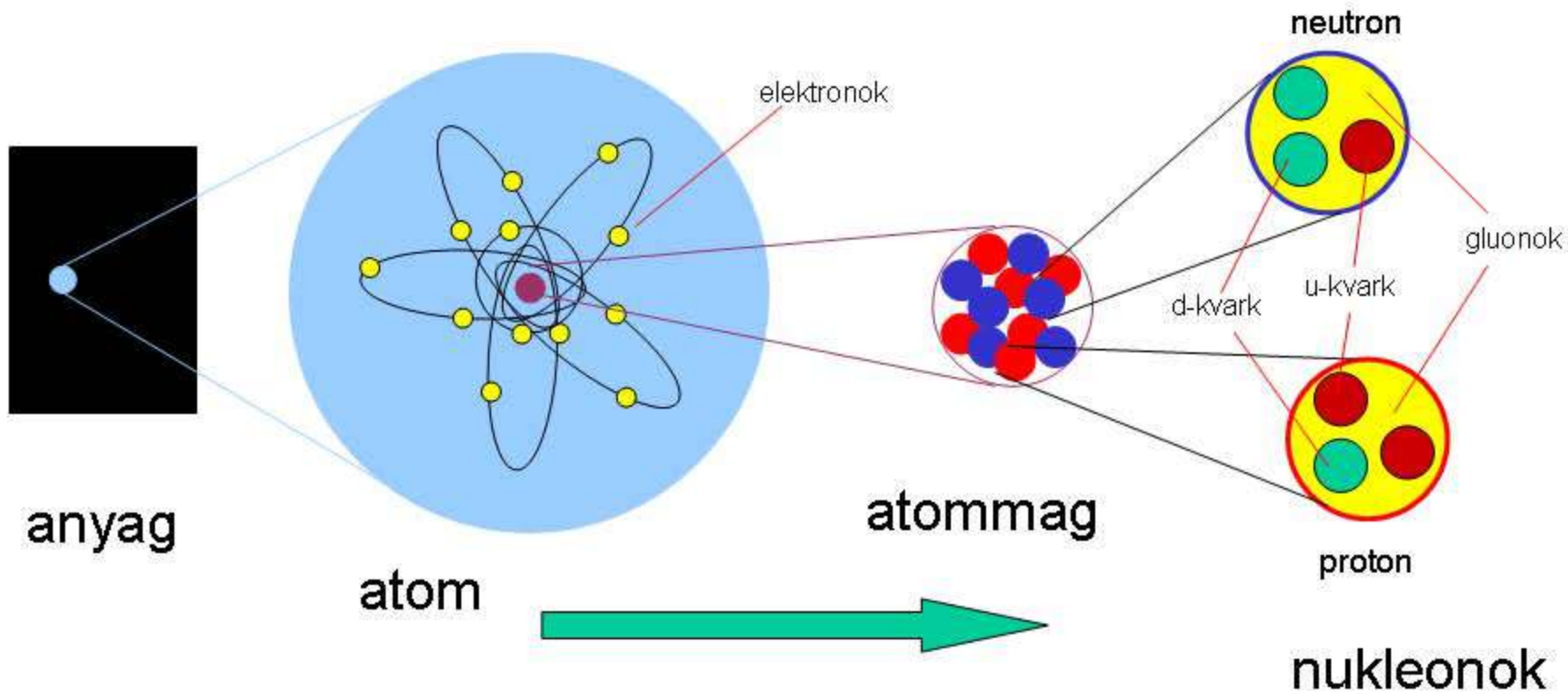


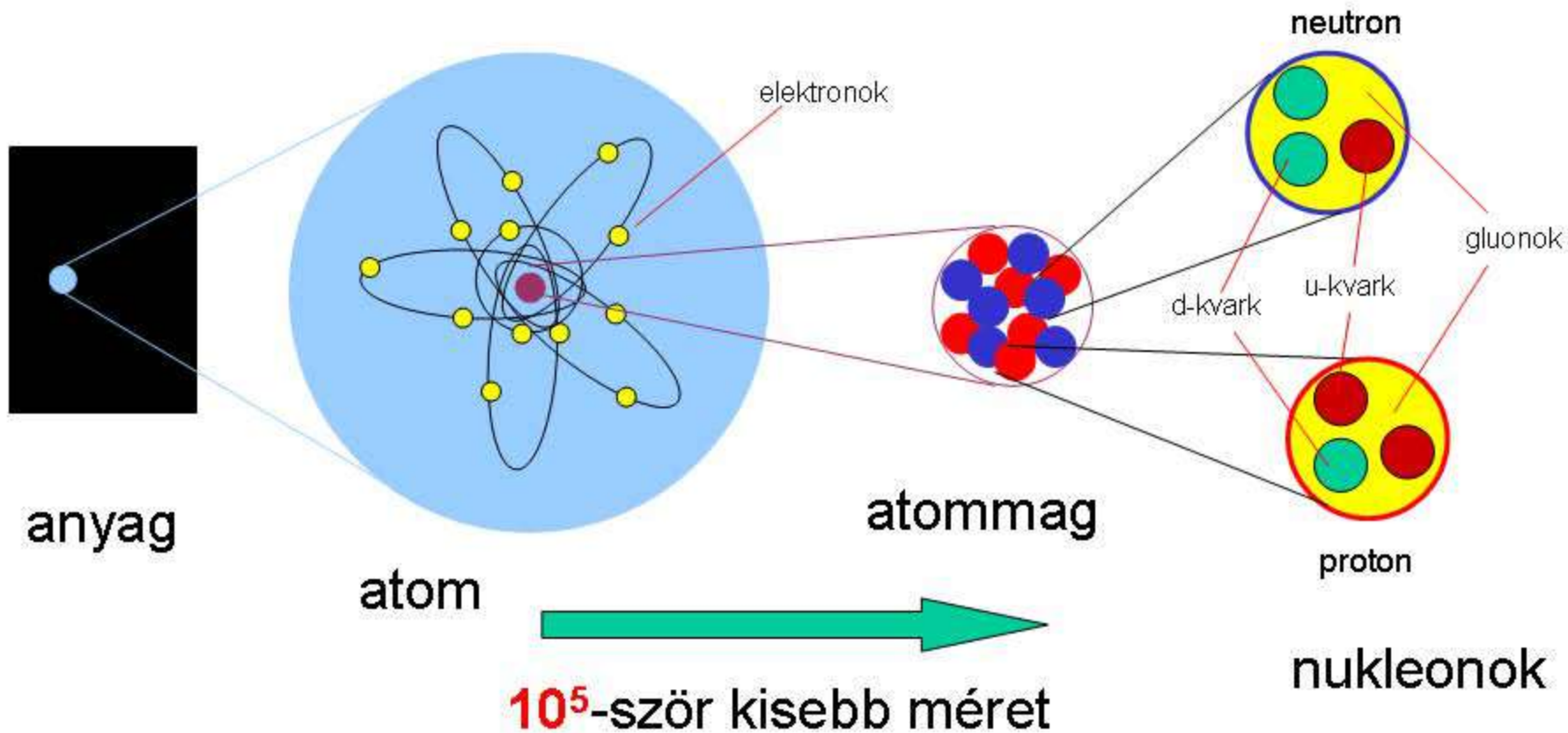


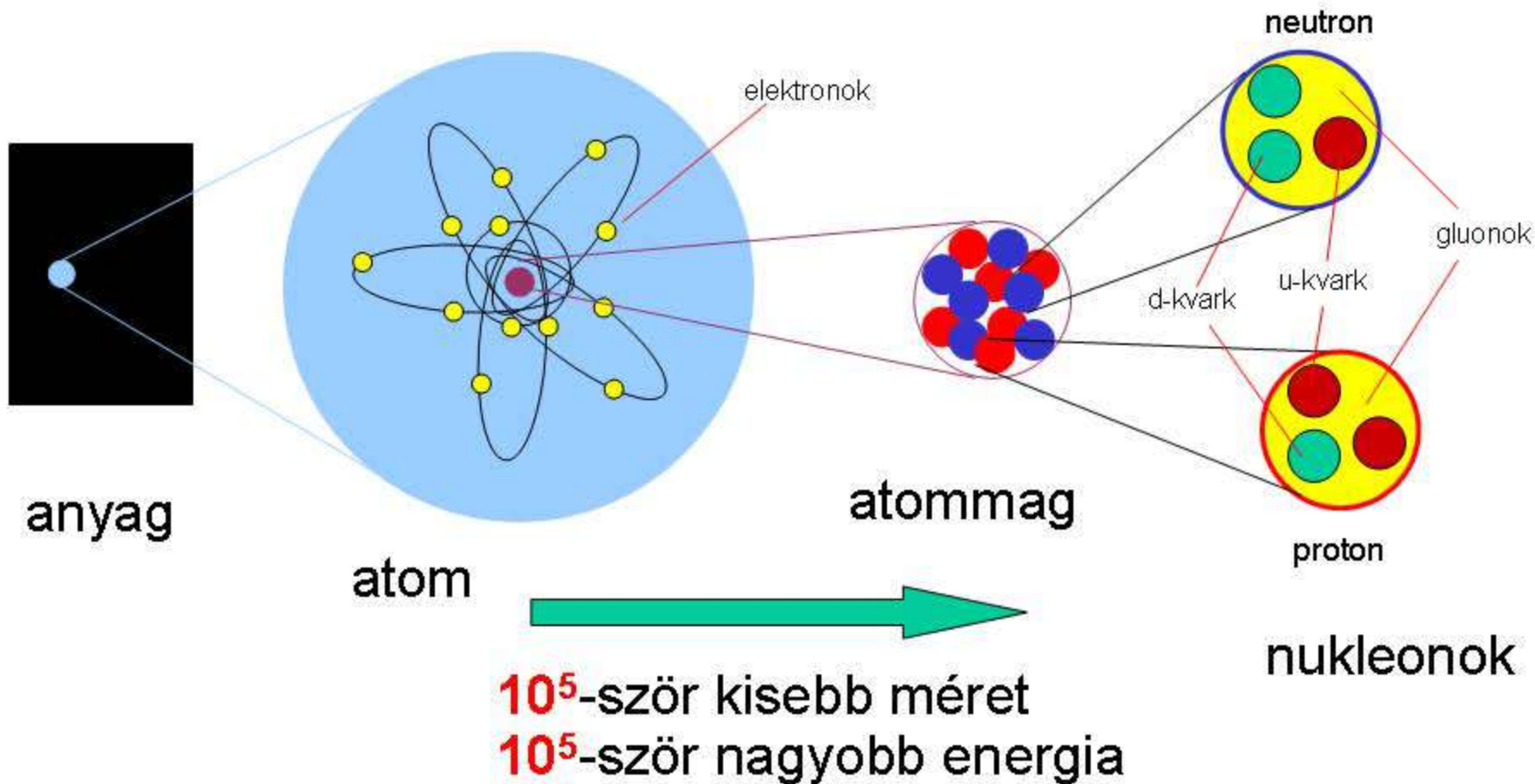




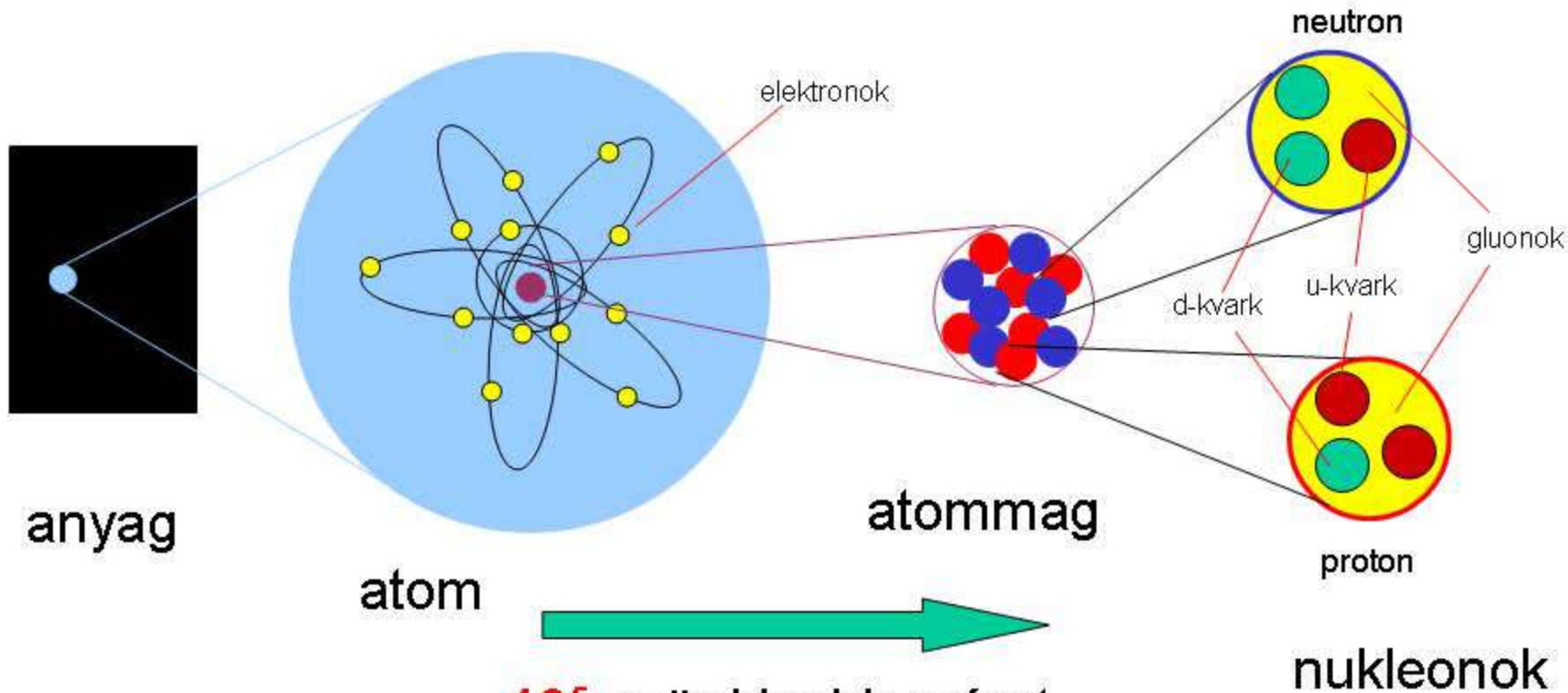








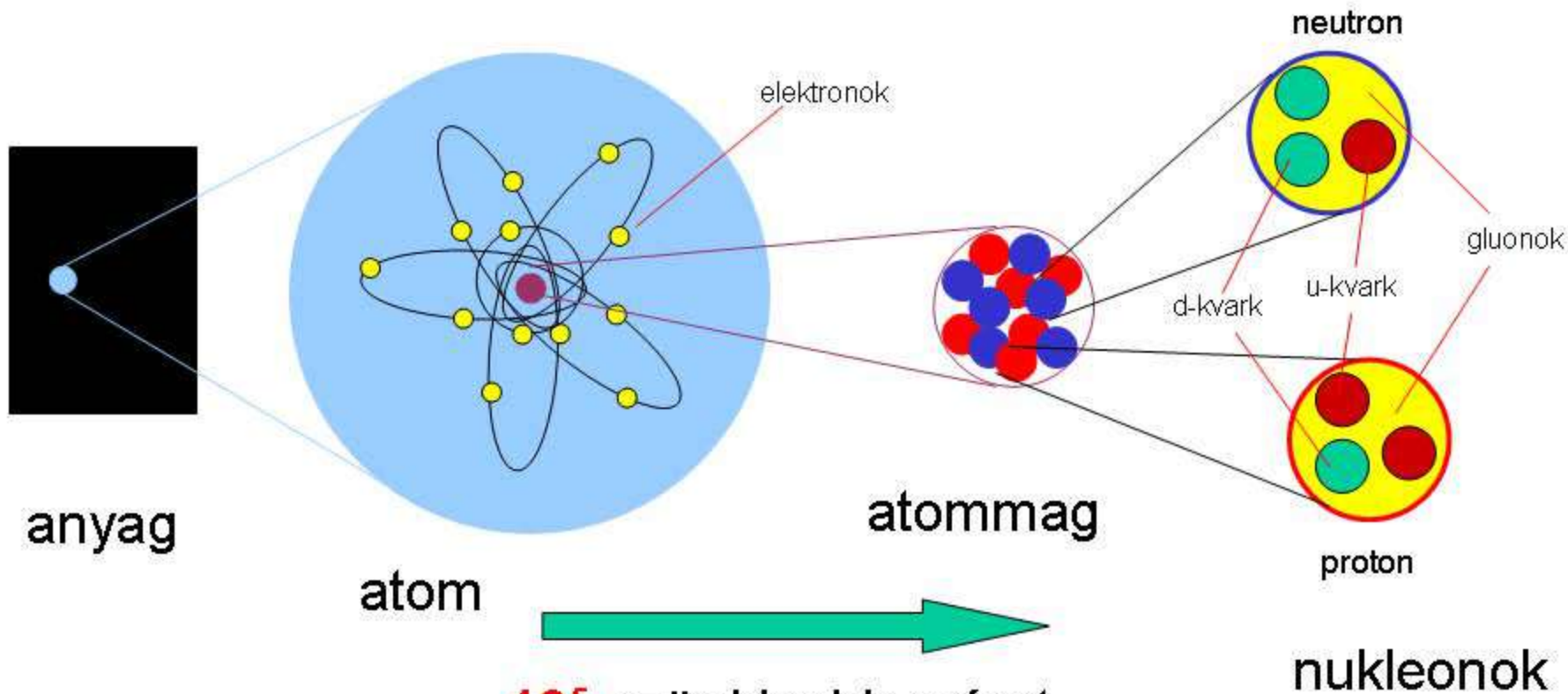




**$10^5$ -ször kisebb méret**  
 **$10^5$ -ször nagyobb energia**

Mi tartja össze az atommagot?





anyag

atom

atommag

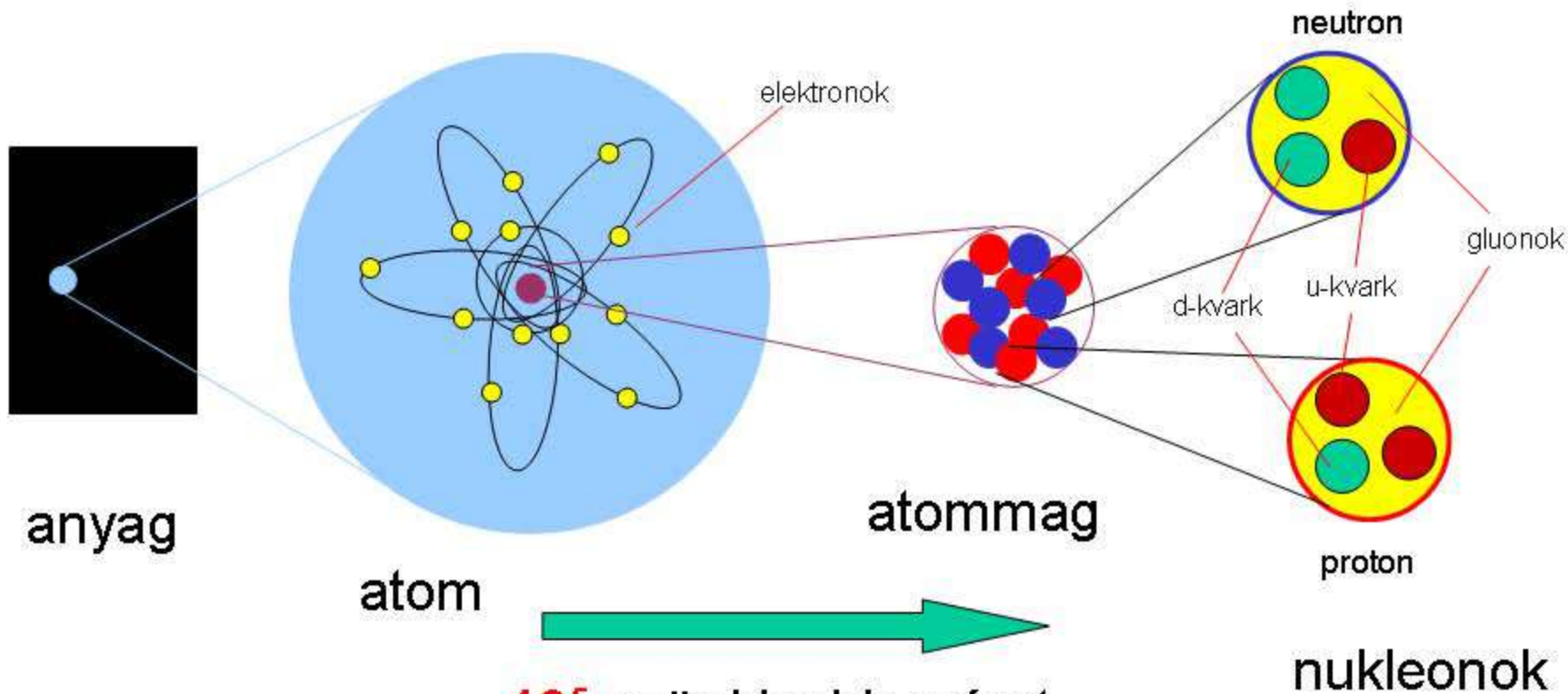
nukleonok

Mi tartja össze az atommagot?

**$10^5$ -ször kisebb méret**  
 **$10^5$ -ször nagyobb energia**

**A MAGERŐ**  
 (erős kölcsönhatás)  
**VONZÓERŐ**





anyag

atom

atommag

nukleonok

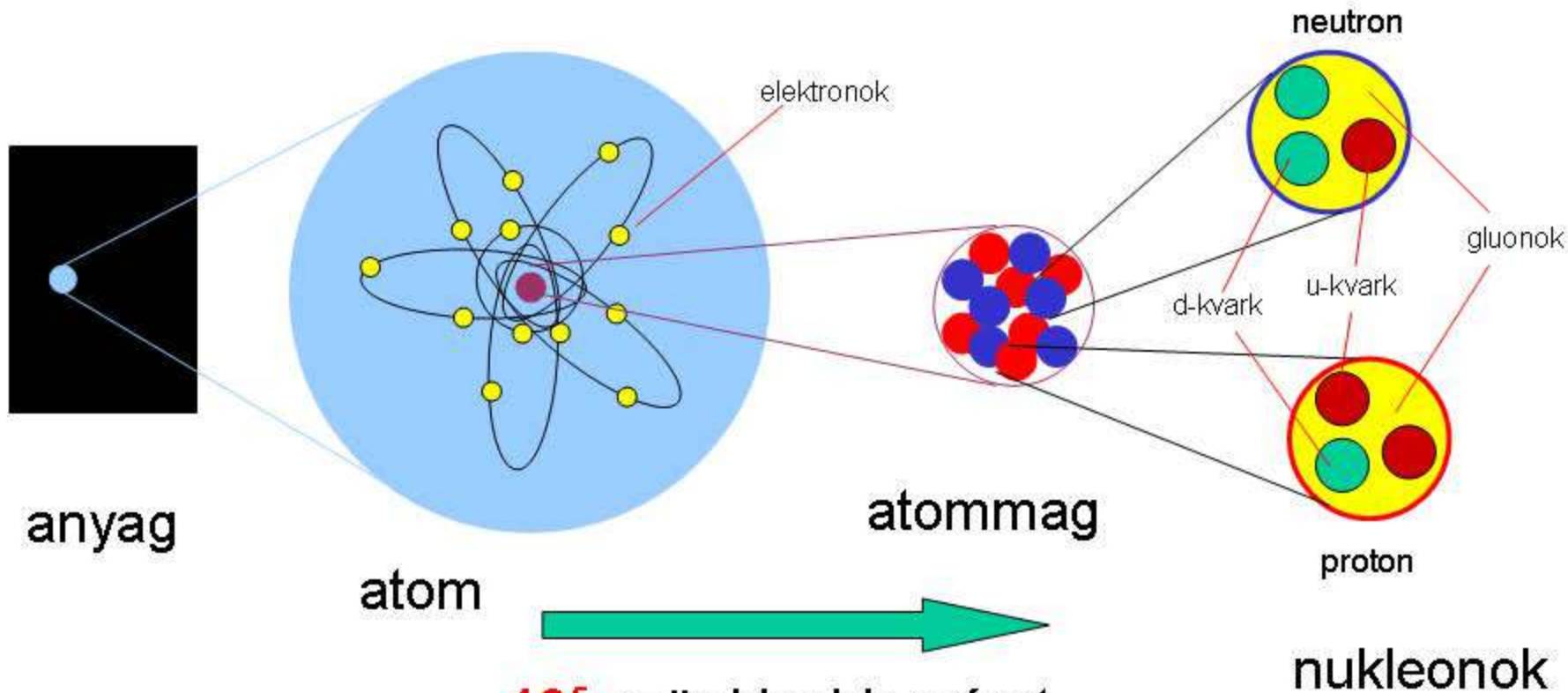
Mi tartja össze az atommagot?

**$10^5$** -ször kisebb méret  
 **$10^5$** -ször nagyobb energia

**A MAGERŐ**  
 (erős kölcsönhatás)  
**VONZÓERŐ**

$$n - n \approx n - p \approx p - p$$





anyag

atom

atommag

nukleonok

Mi tartja össze az atommagot?

$10^5$ -ször kisebb méret  
 $10^5$ -ször nagyobb energia

**A MAGERŐ**  
 (erős kölcsönhatás)  
**VONZÓERŐ**

$$n - n \approx n - p \approx p - p$$

itt még egy kis elektromos taszítás is fellép...



# elektromos erőhatás



# elektromos erőhatás

elektromos vonzás



# elektromos erőhatás

elektromos vonzás

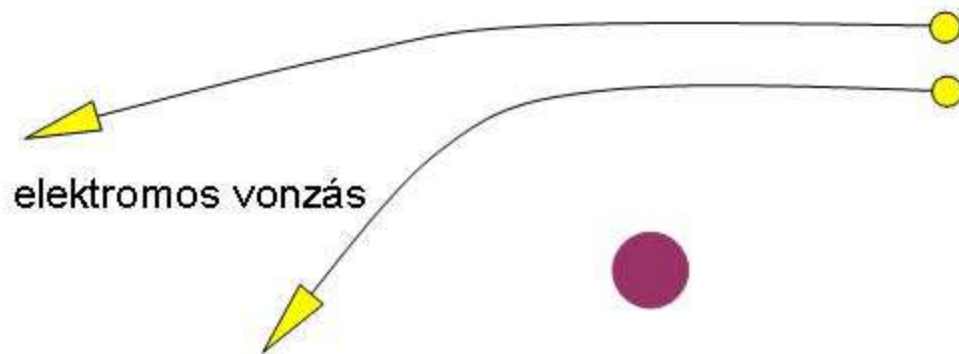


# elektromos erőhatás

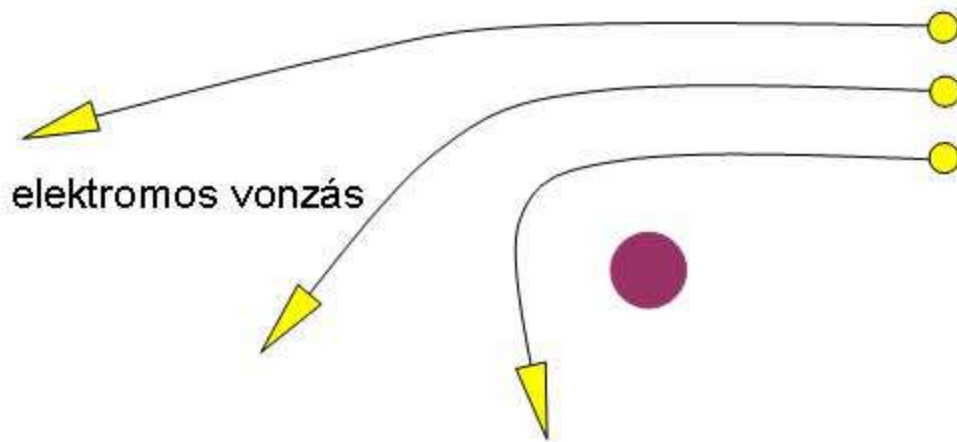




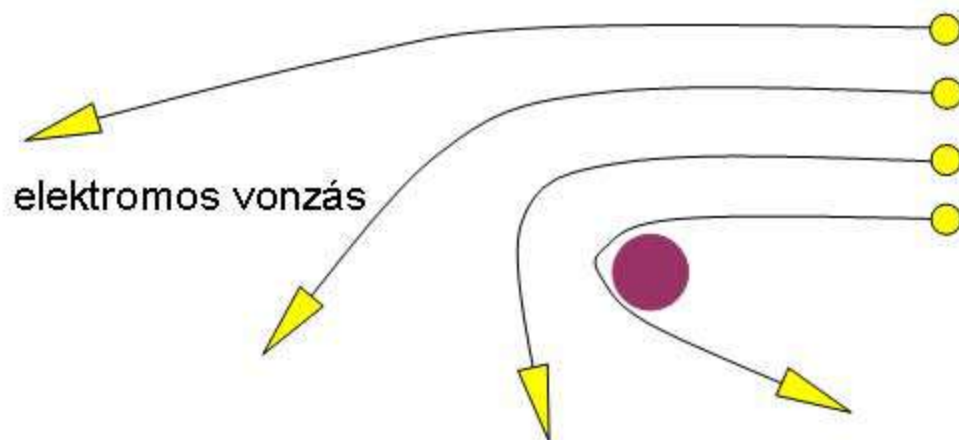
# elektromos erőhatás



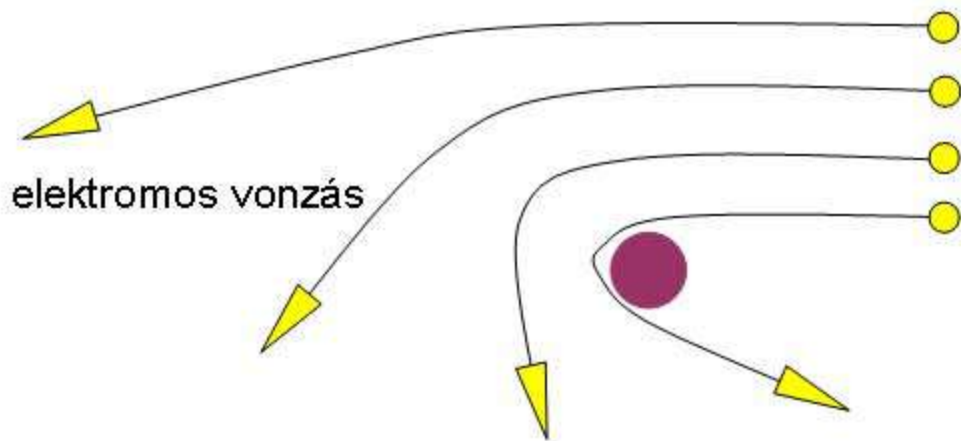
# elektromos erőhatás



# elektromos erőhatás

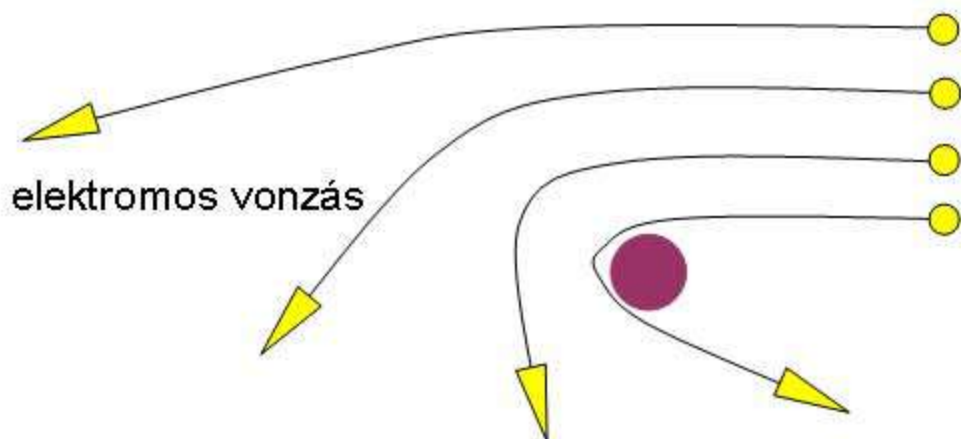


# elektromos erőhatás



hatótávolság =  $\infty$

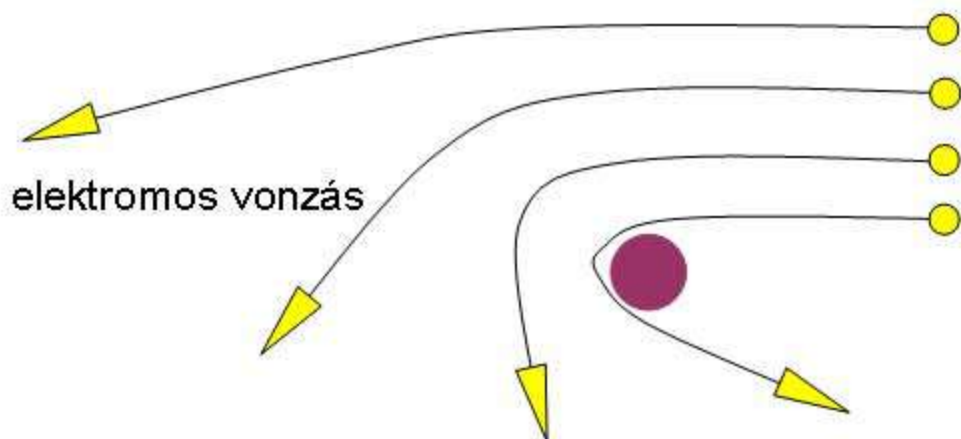
# elektromos erőhatás



hatótávolság =  $\infty$

elektromos taszítás

# elektromos erőhatás

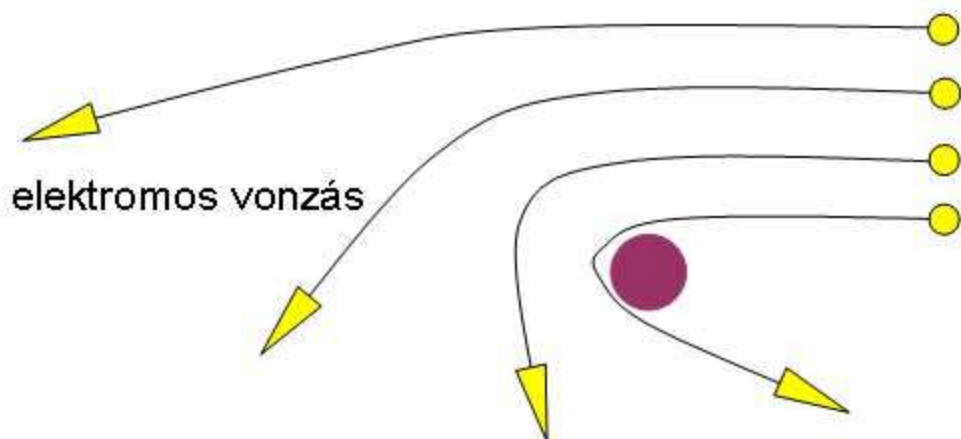


hatótávolság =  $\infty$

elektromos taszítás



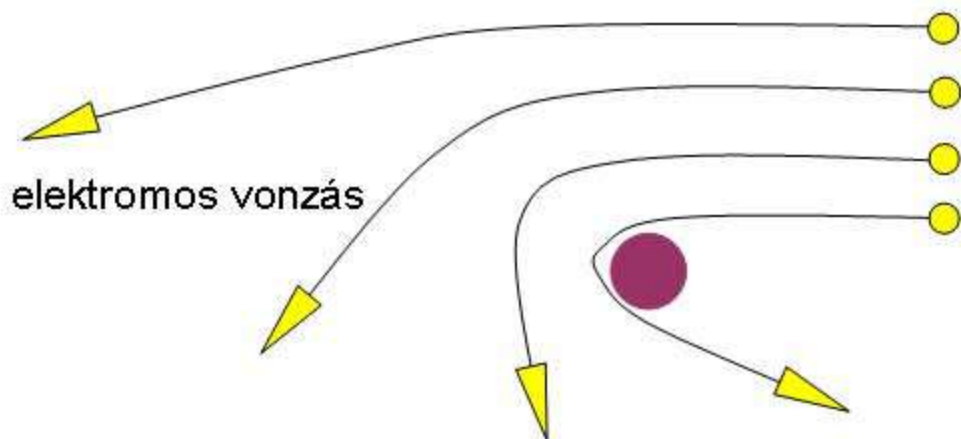
# elektromos erőhatás



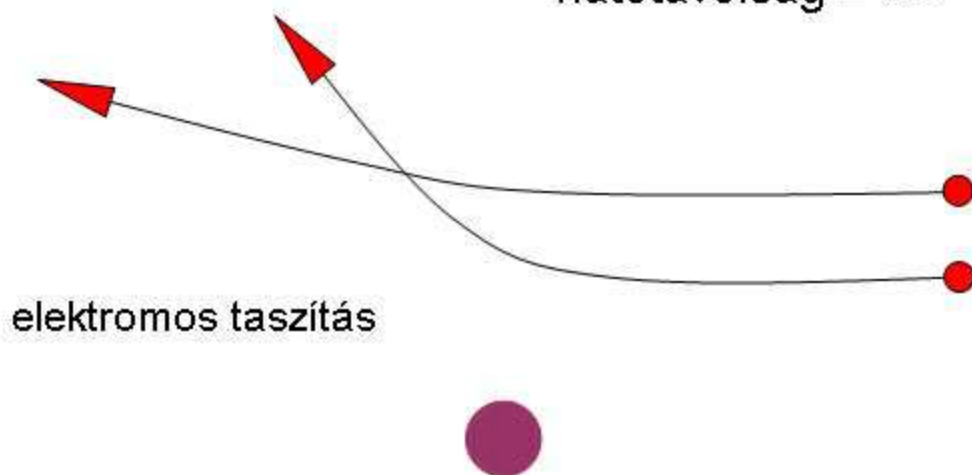
hatótávolság =  $\infty$



# elektromos erőhatás

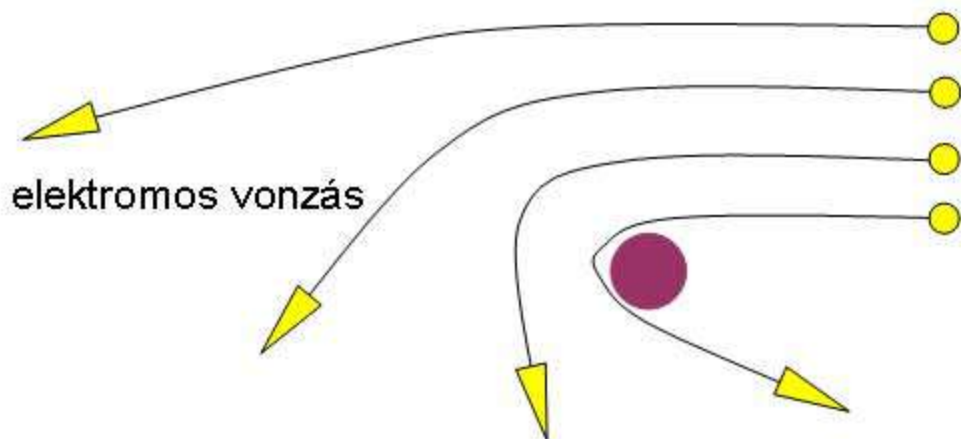


hatótávolság =  $\infty$

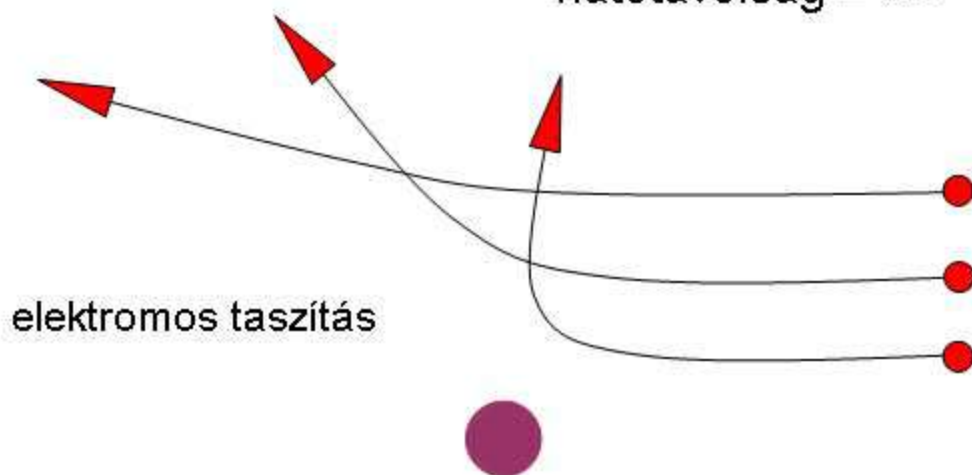




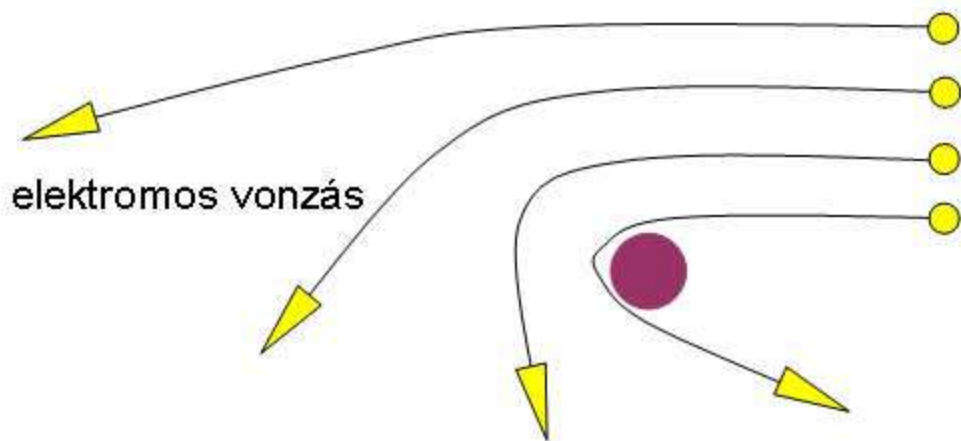
# elektromos erőhatás



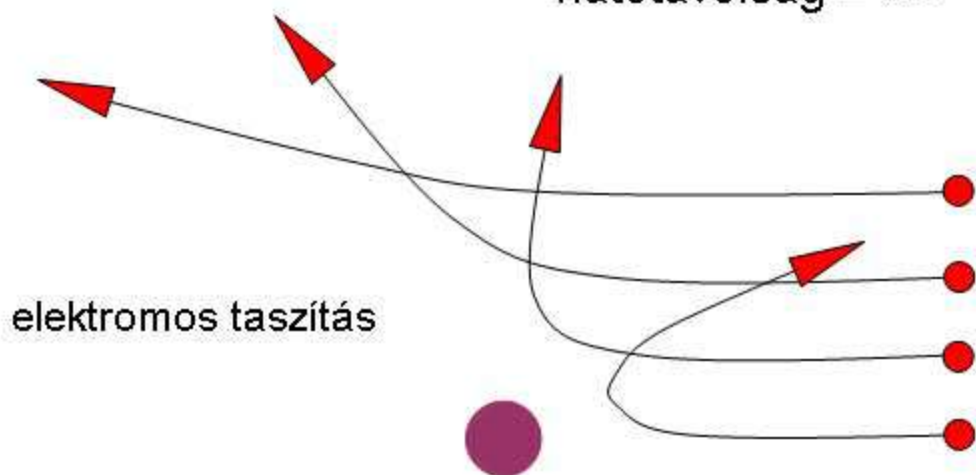
hatótávolság =  $\infty$



# elektromos erőhatás

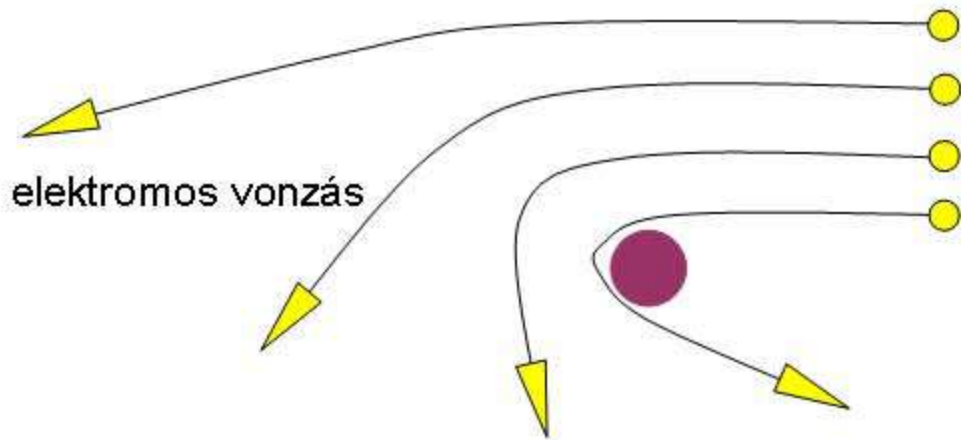


hatótávolság =  $\infty$

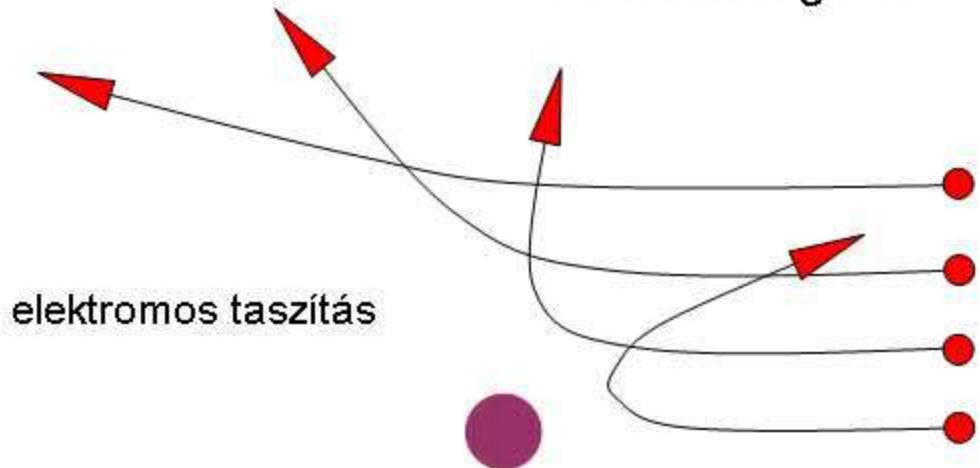


# elektromos erőhatás

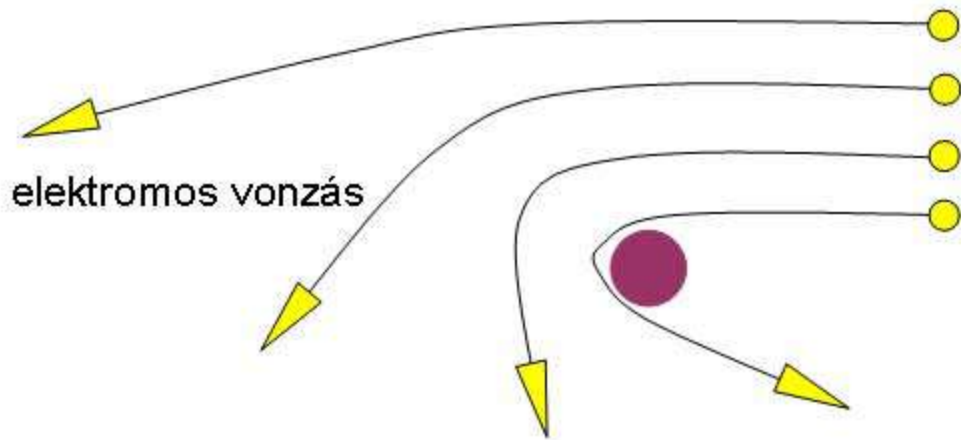
# magerő



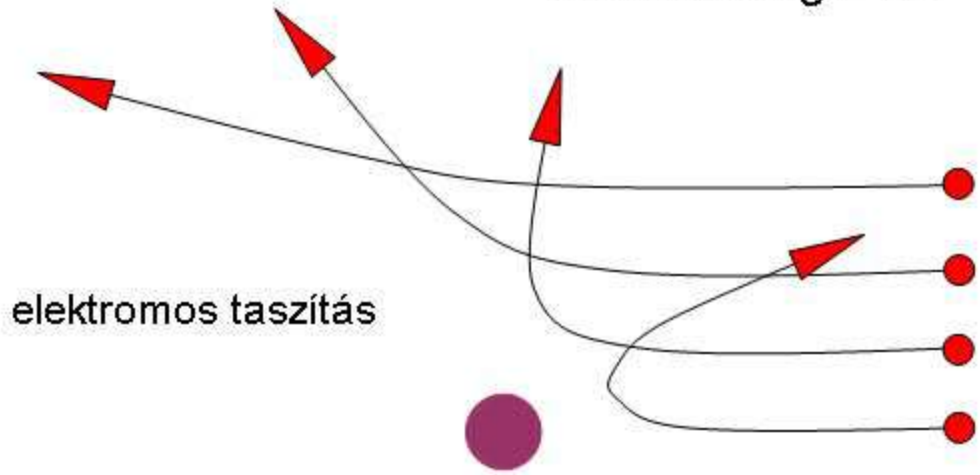
hatótávolság =  $\infty$



# elektromos erőhatás



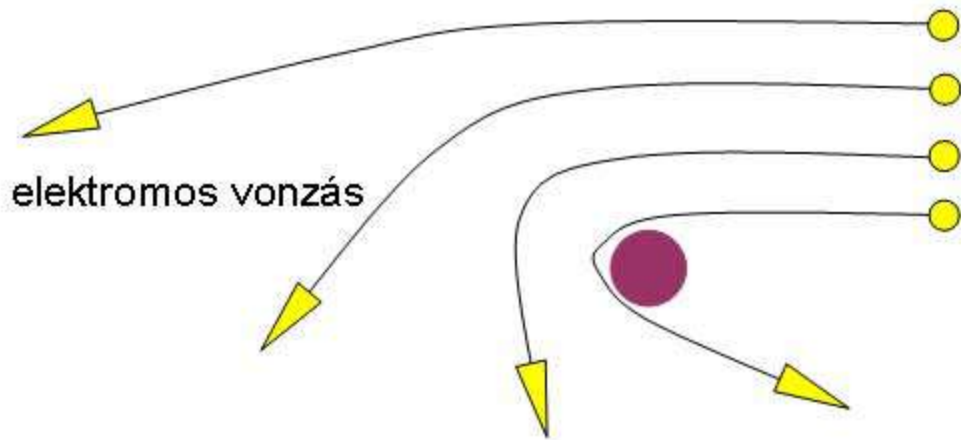
hatótávolság =  $\infty$



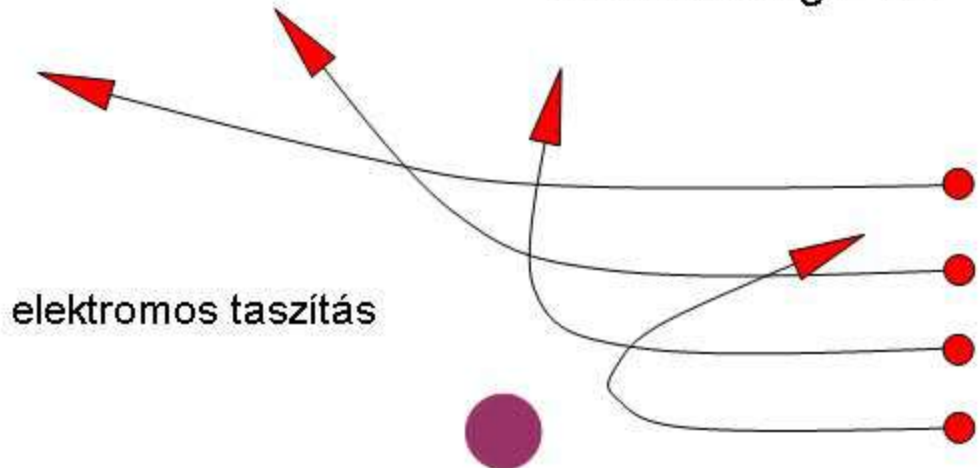
# magerő



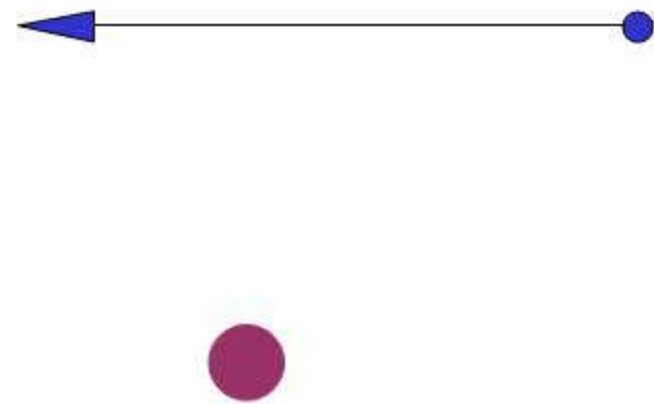
# elektromos erőhatás



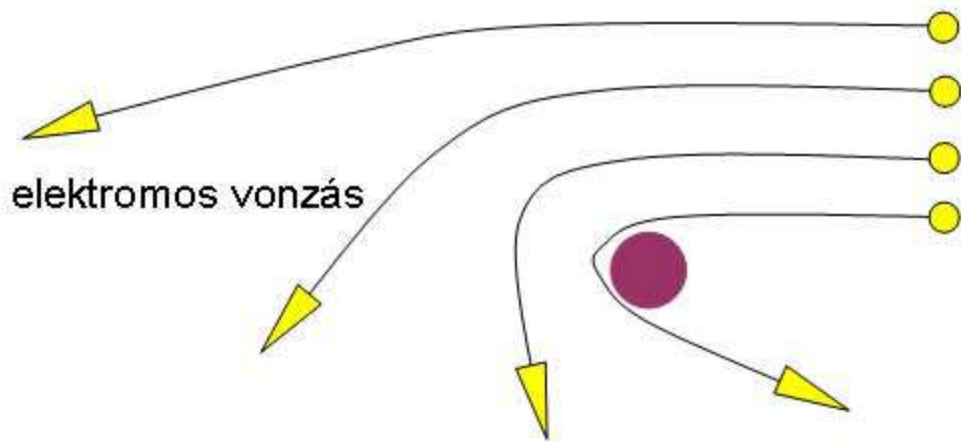
hatótávolság =  $\infty$



# magerő

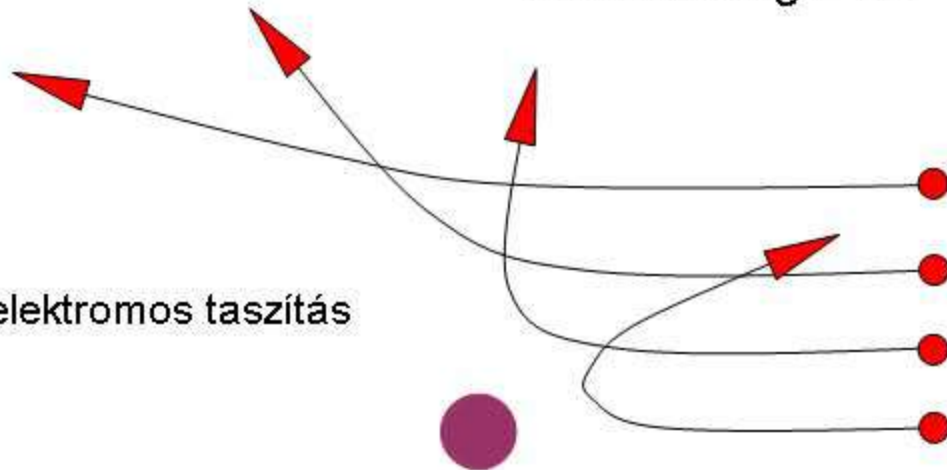


## elektromos erőhatás



hatótávolság =  $\infty$

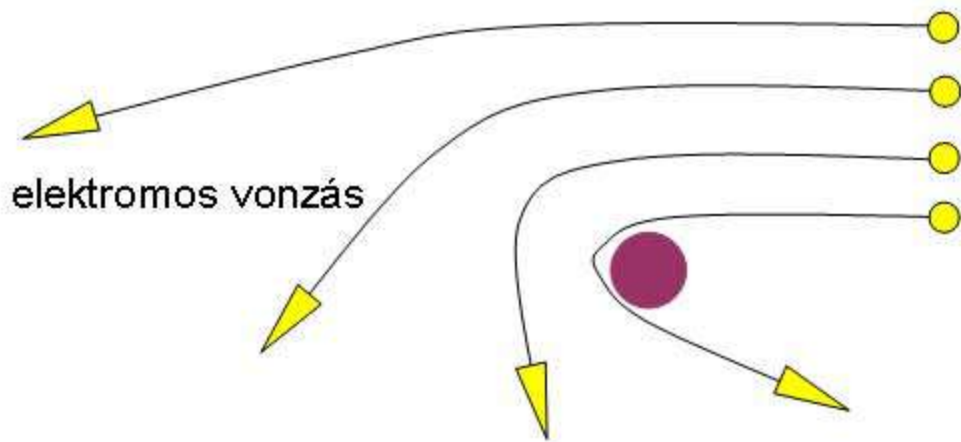
elektromos taszítás



## magerő

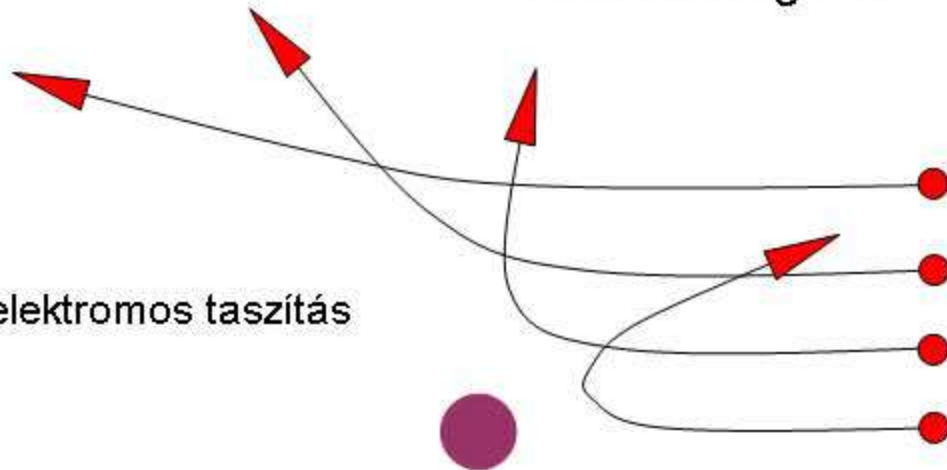


## elektromos erőhatás

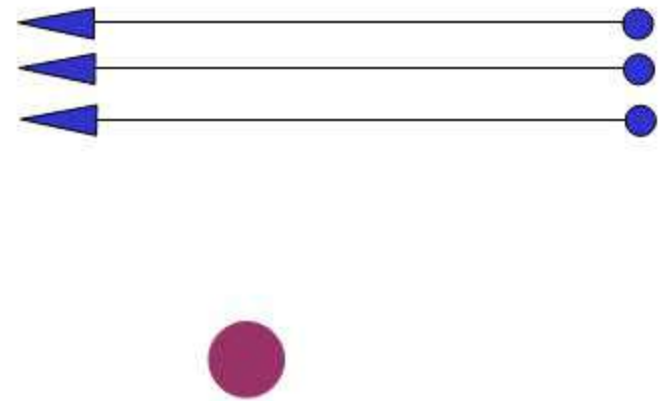


hatótávolság =  $\infty$

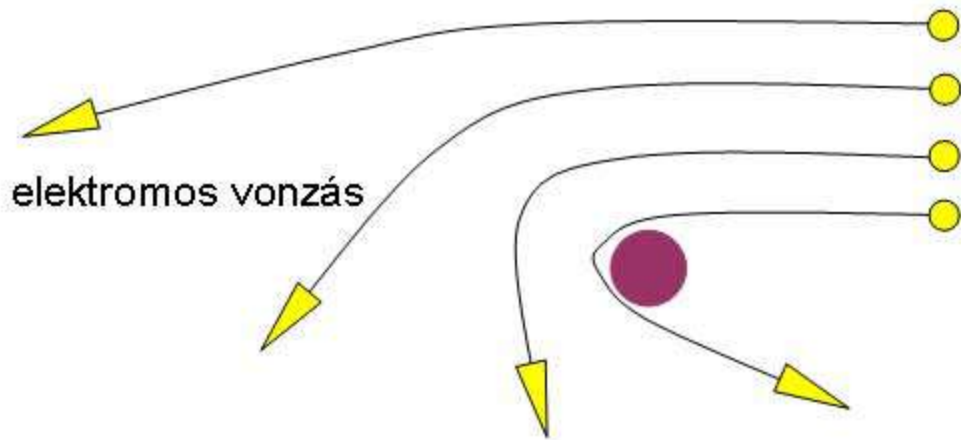
elektromos taszítás



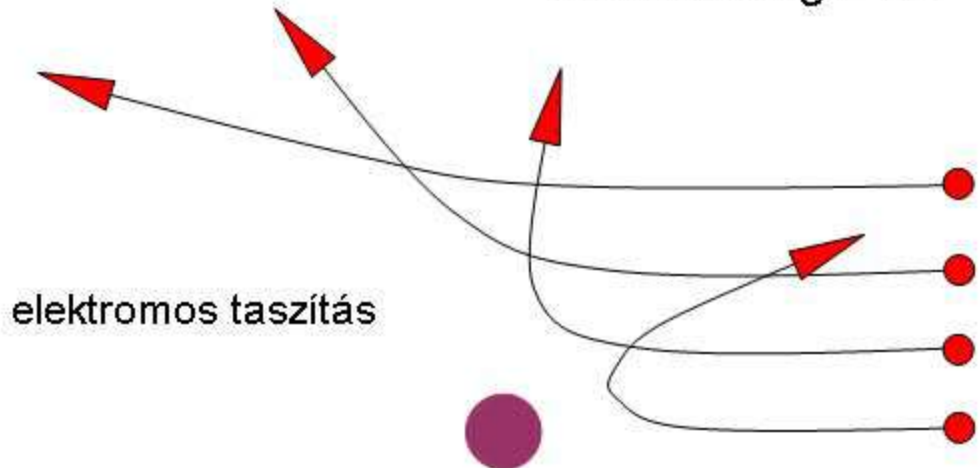
## magerő



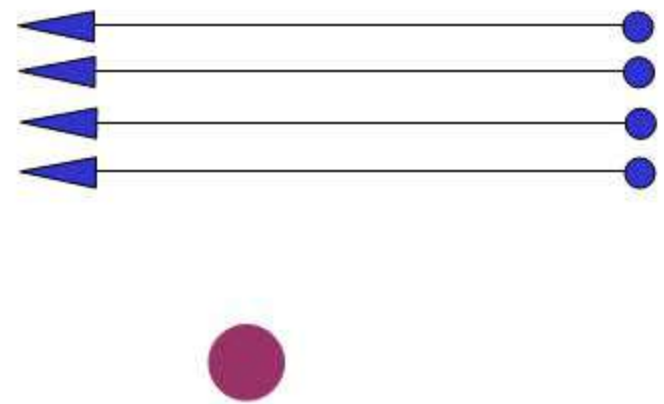
## elektromos erőhatás



hatótávolság =  $\infty$

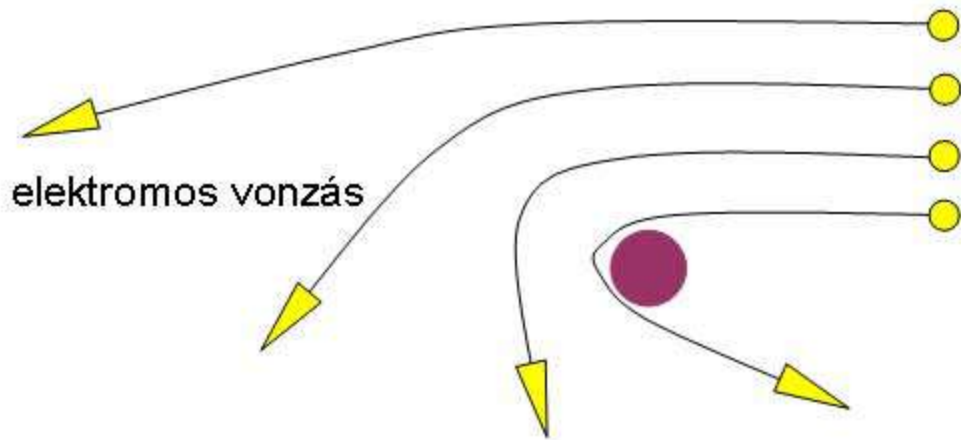


## magerő

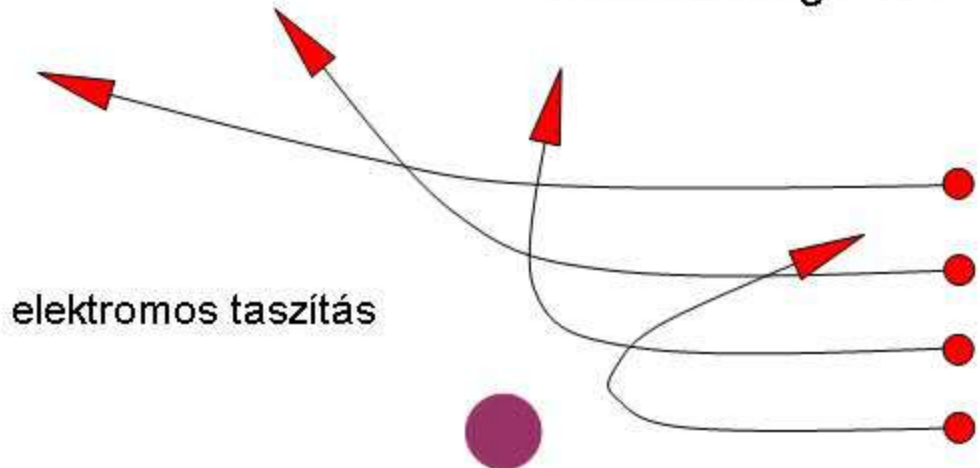




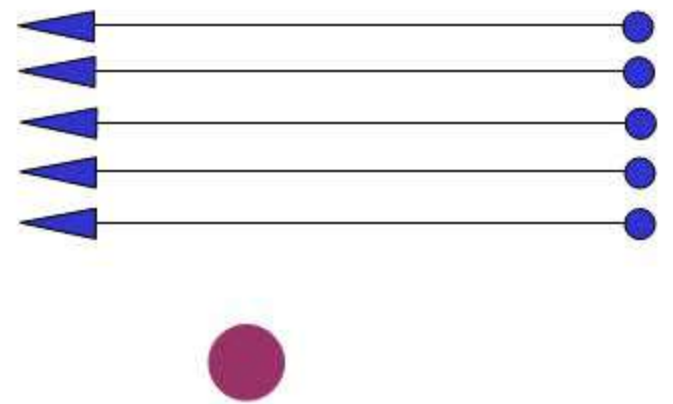
## elektromos erőhatás



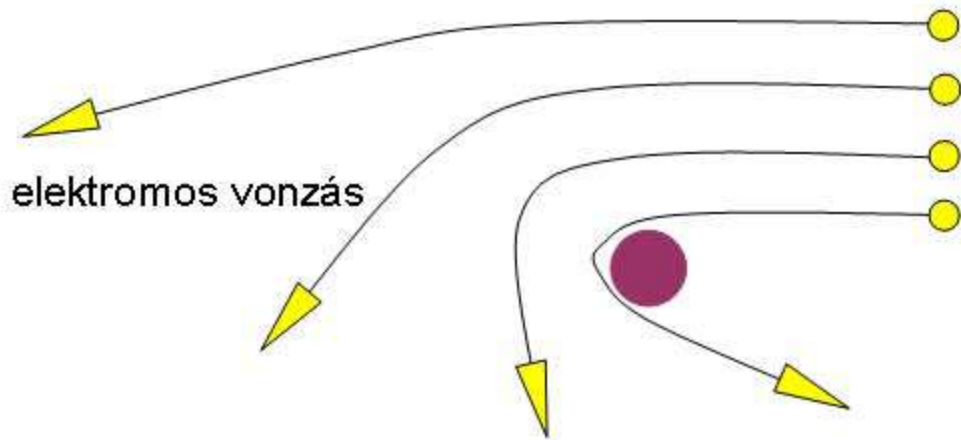
hatótávolság =  $\infty$



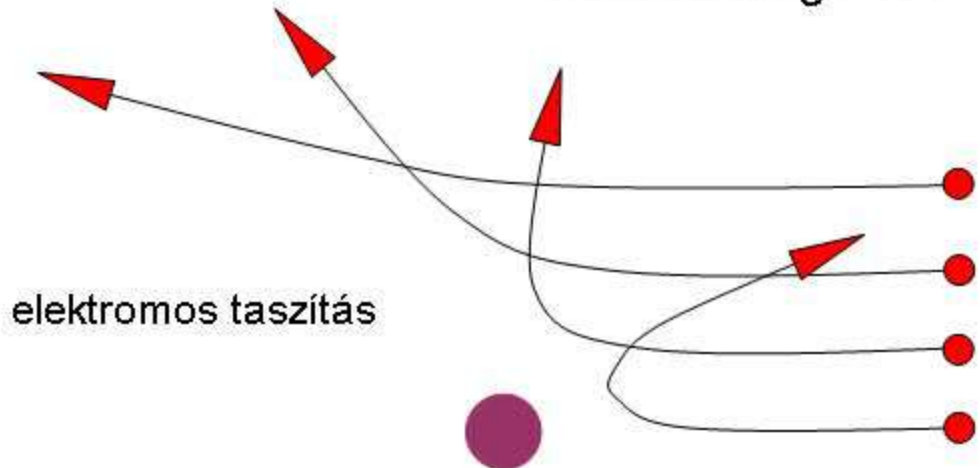
## magerő



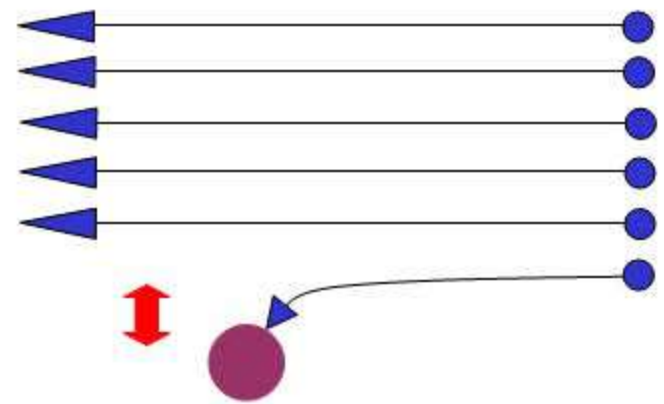
## elektromos erőhatás



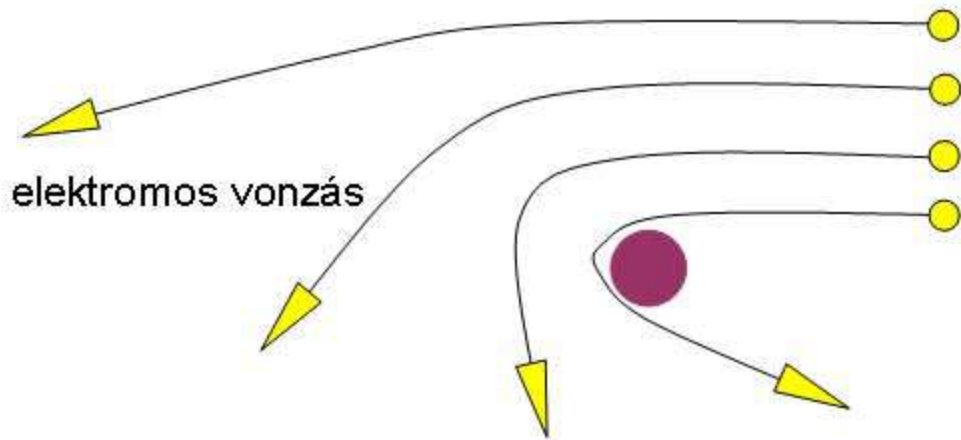
hatótávolság =  $\infty$



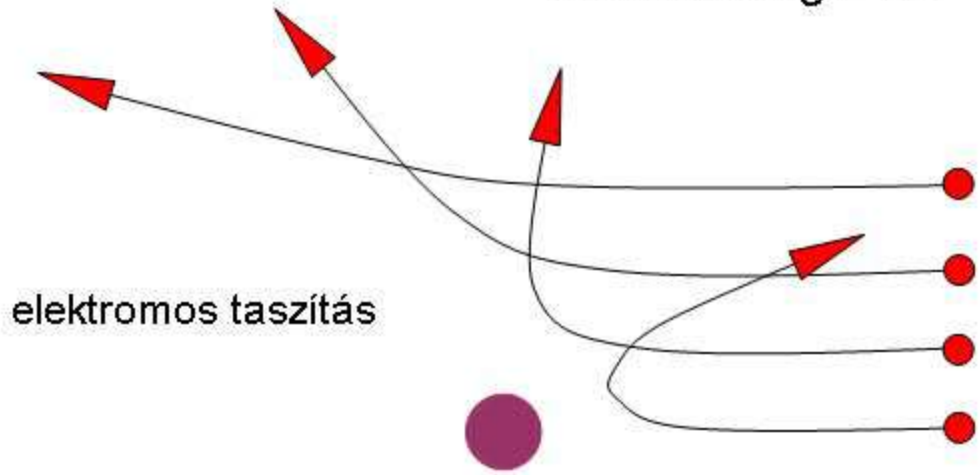
## magerő



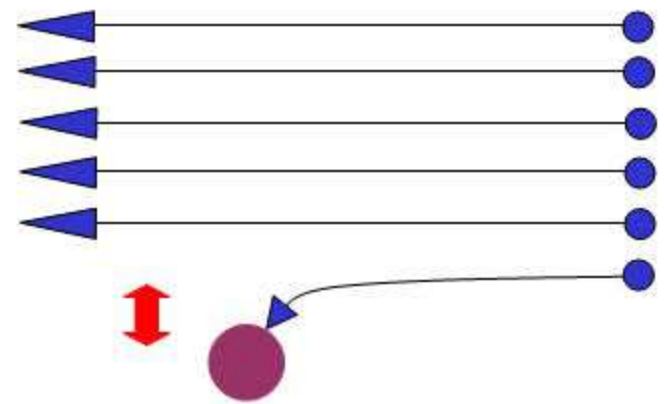
## elektromos erőhatás



hatótávolság =  $\infty$



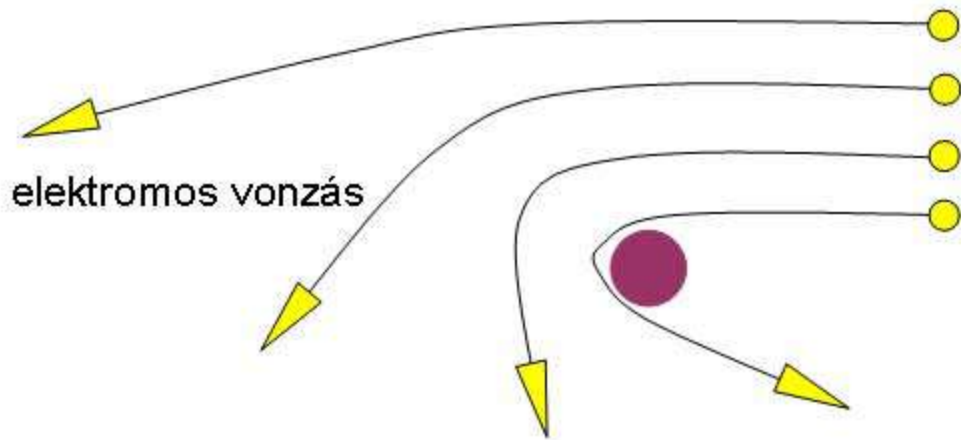
## magerő



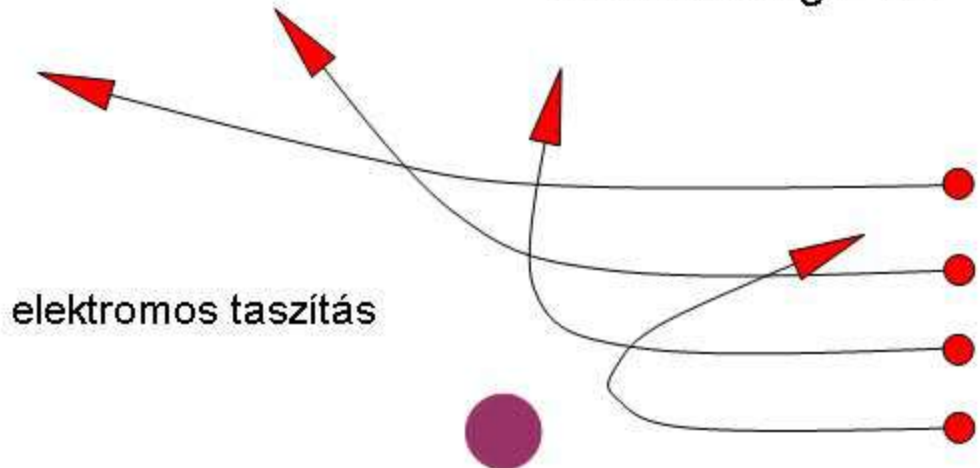
hatótávolság  $\approx$  a nukleon mérete



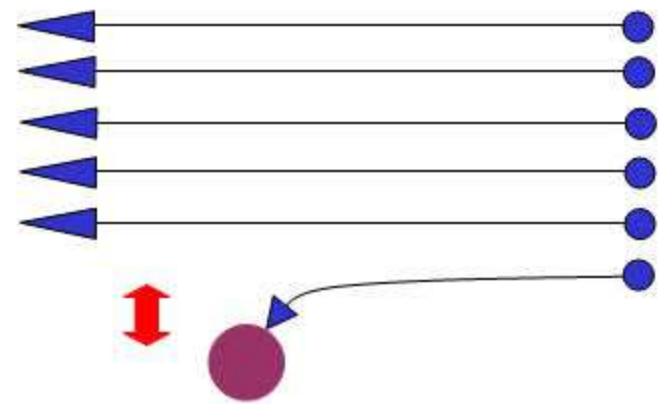
## elektromos erőhatás



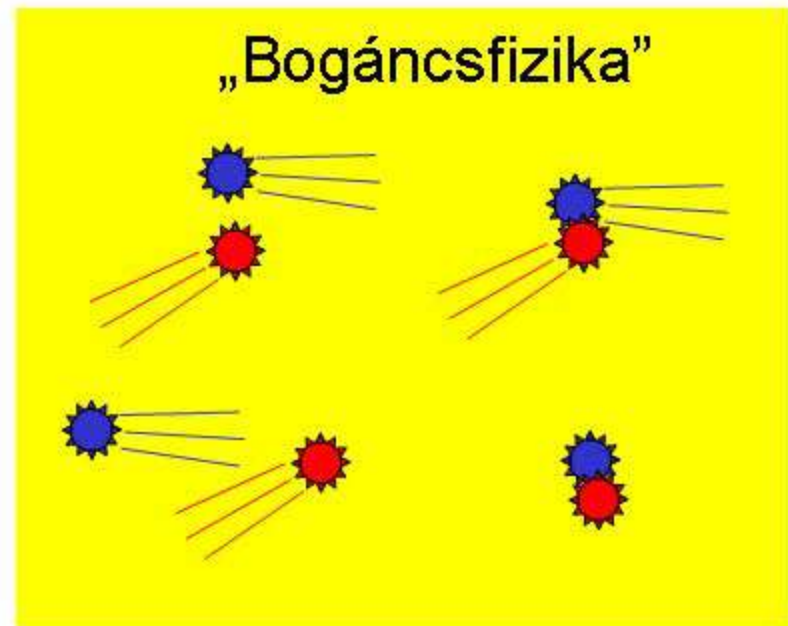
hatótávolság =  $\infty$



## magerő



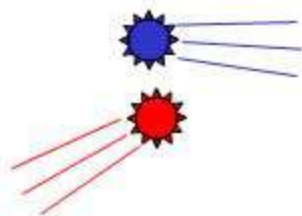
hatótávolság  $\approx$  a nukleon mérete



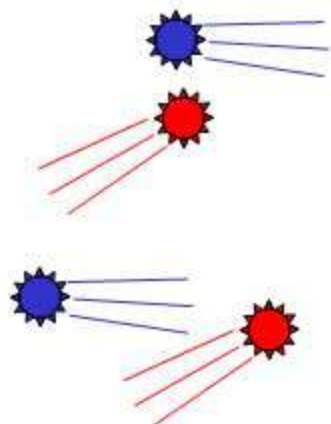
# „Bogáncofizika”



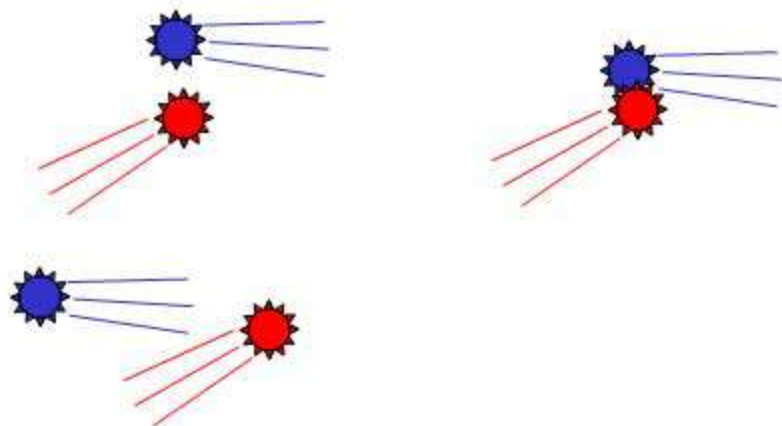
# „Bogáncofizika”



# „Bogáncofizika”

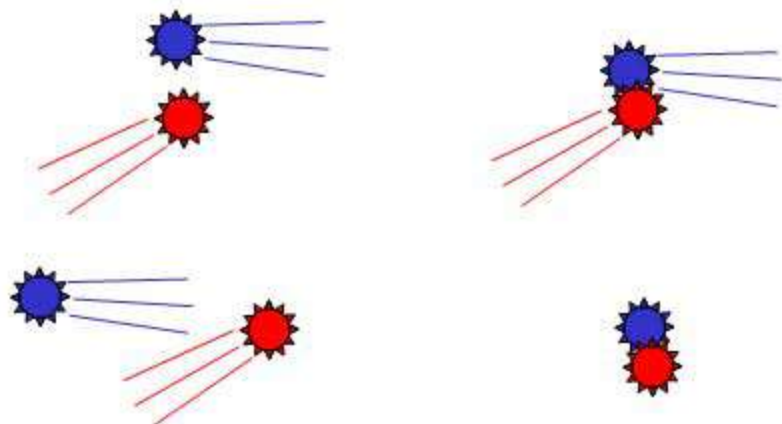


# „Bogáncofizika”

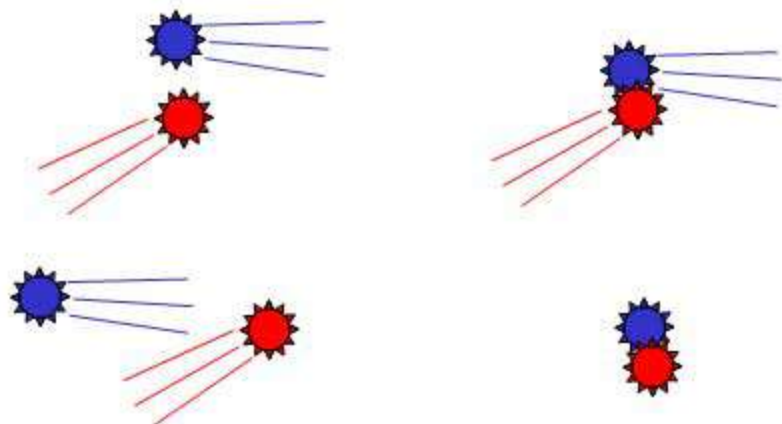




# „Bogánccsfizika”



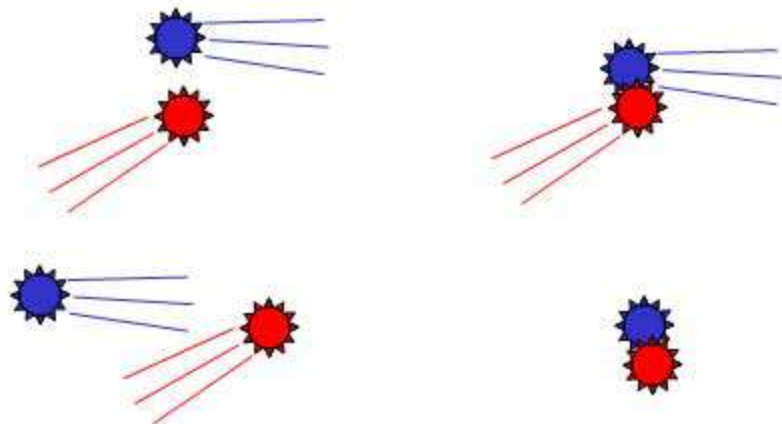
# „Bogáncofizika”



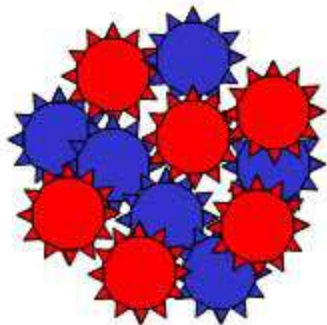
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



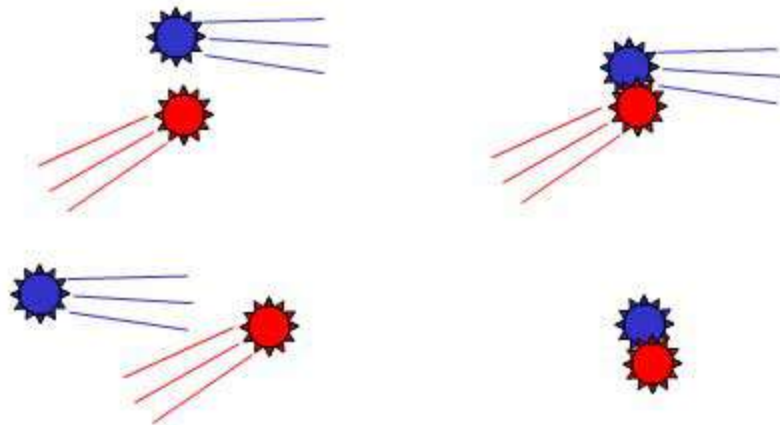
# „Bogánccsfizika”



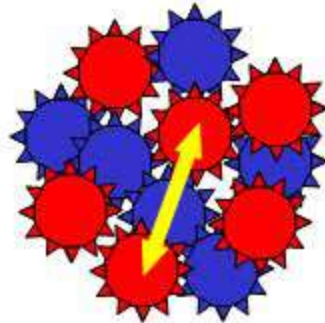
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



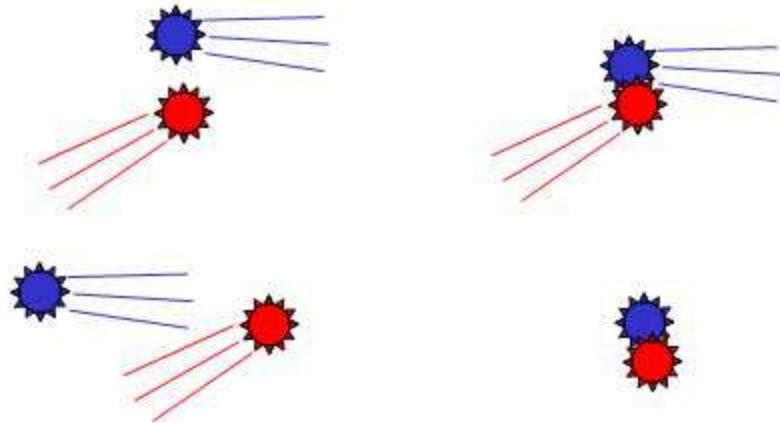
# „Bogáncofizika”



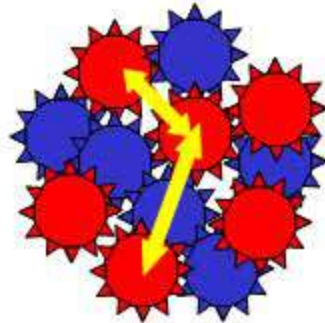
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



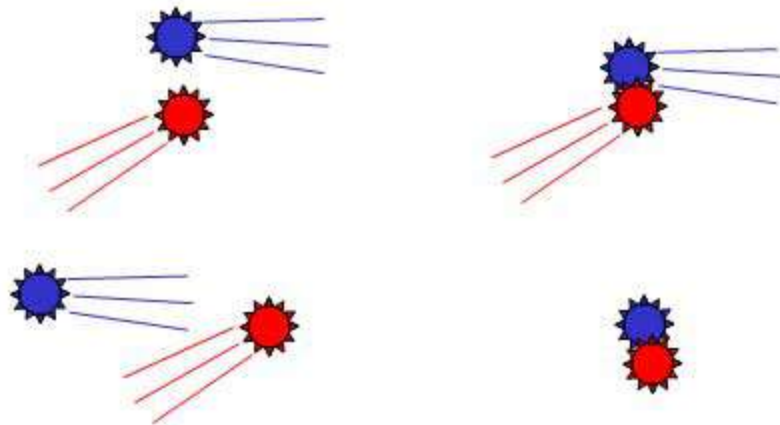
# „Bogáncofizika”



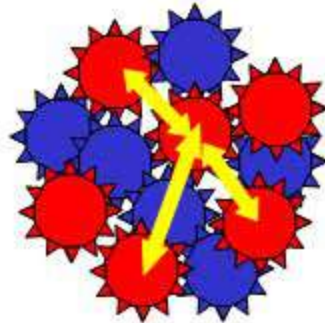
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



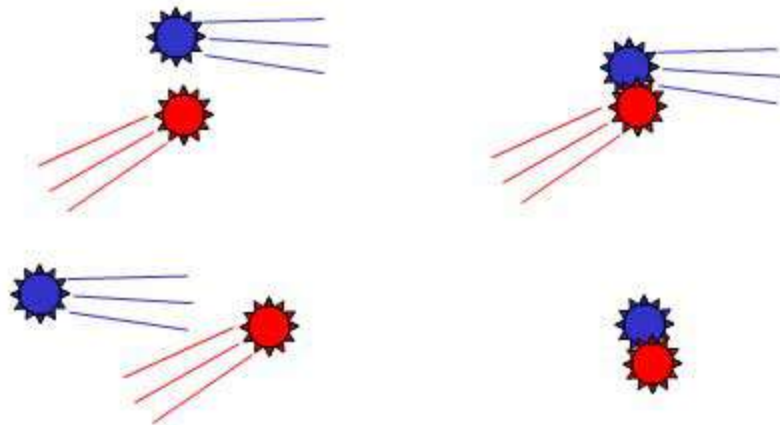
# „Bogánccsfizika”



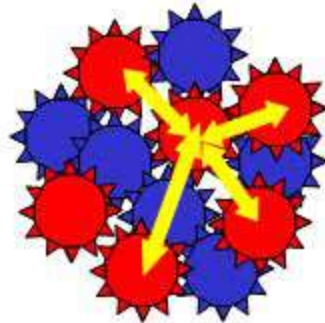
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



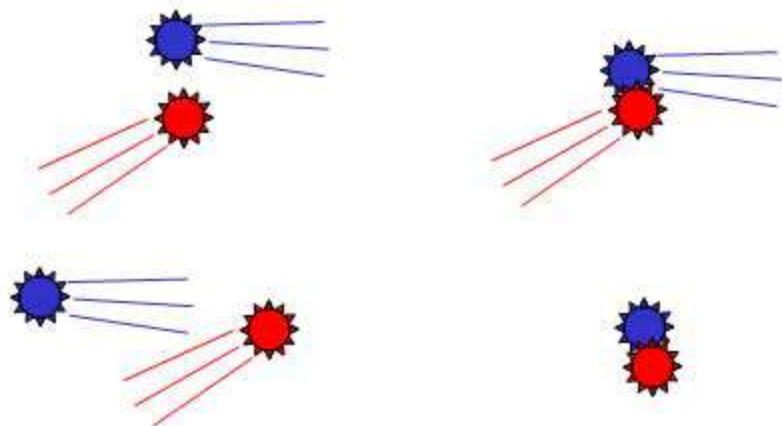
# „Bogánccsfizika”



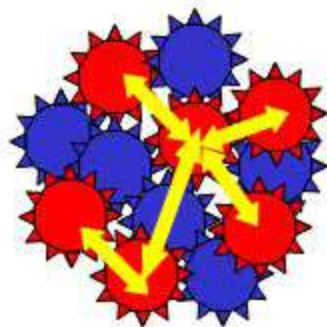
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



# „Bogánccsfizika”

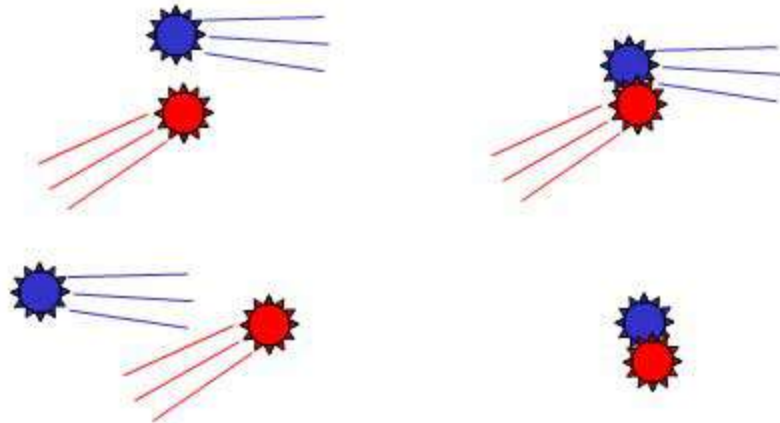


elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között

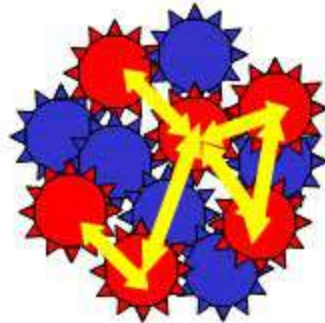




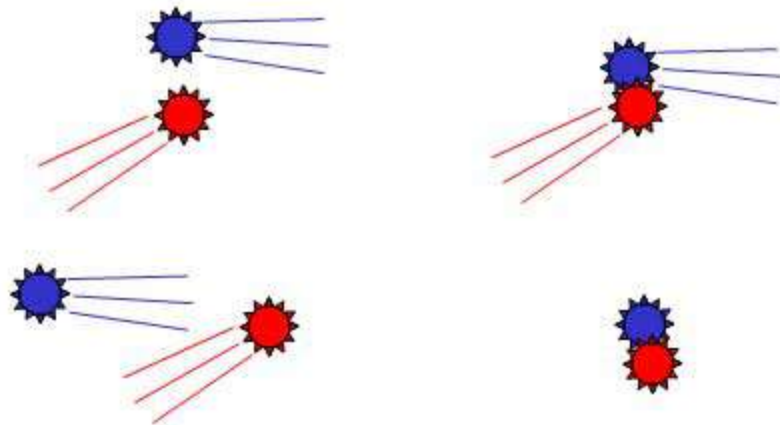
# „Bogánccsfizika”



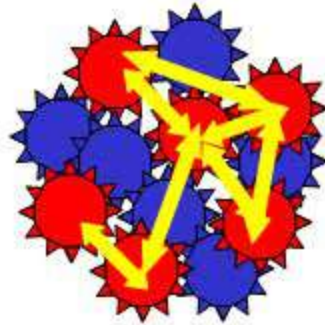
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



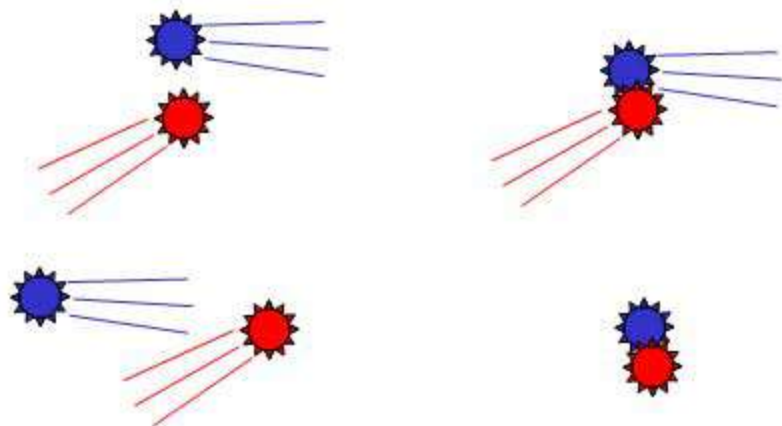
# „Bogáncofizika”



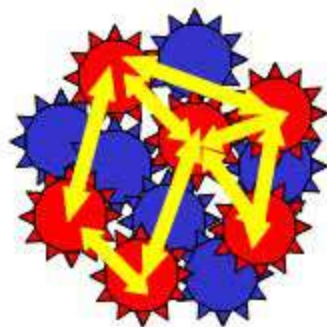
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



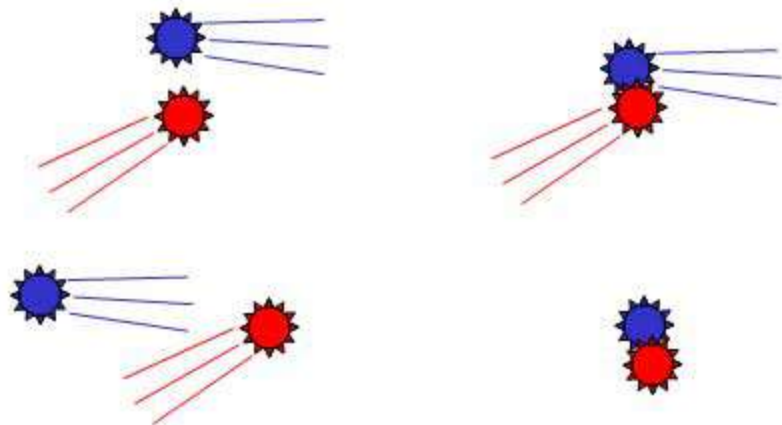
# „Bogáncofizika”



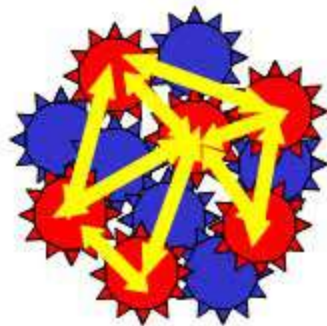
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



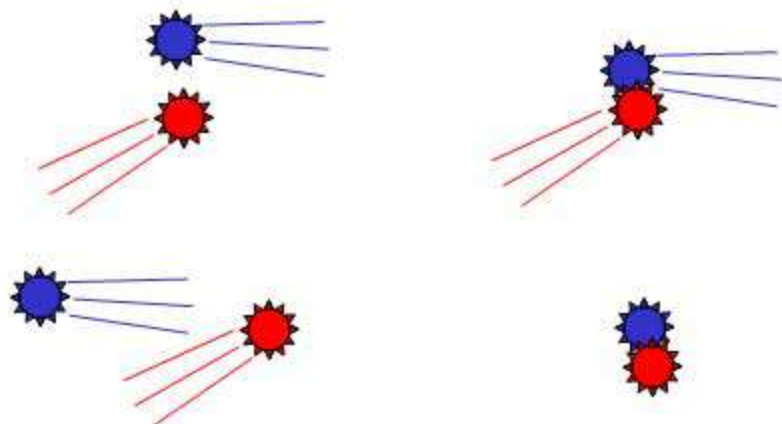
# „Bogáncofizika”



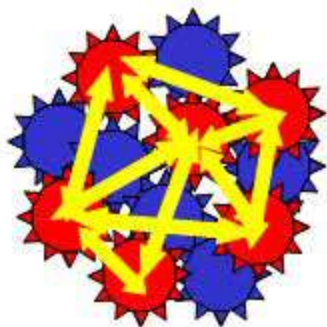
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



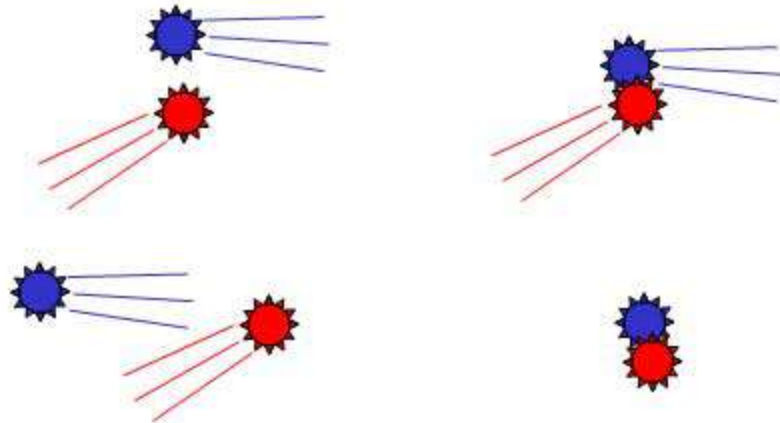
# „Bogánccsfizika”



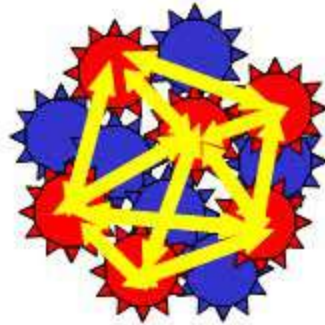
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



# „Bogánccsfizika”

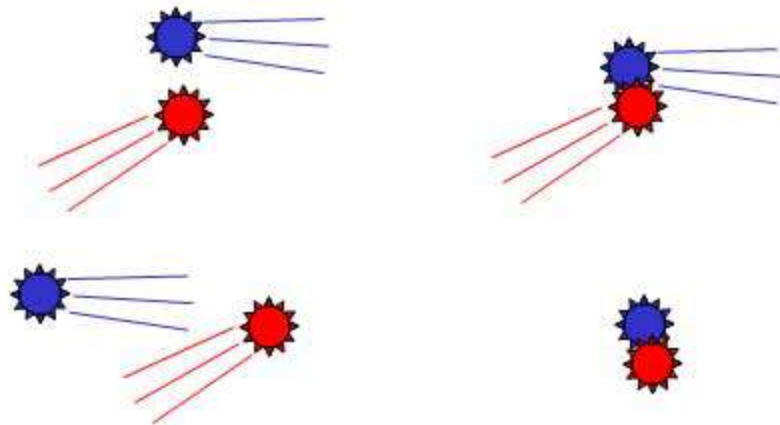


elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között

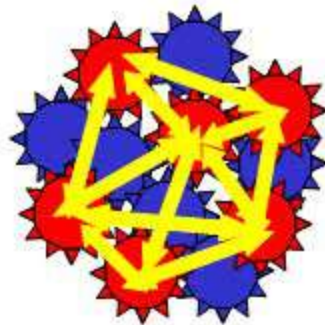


# „Bogánccsfizika”

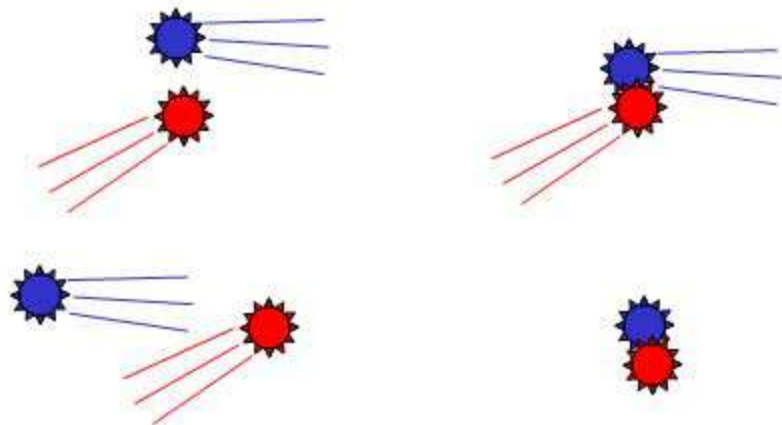
# Összetettebb atommag



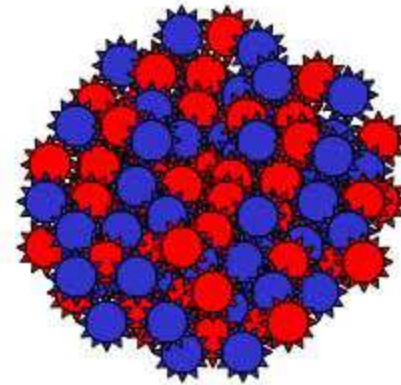
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



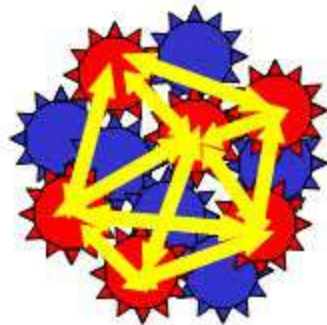
## „Bogánccsfizika”



## Összetettebb atommag

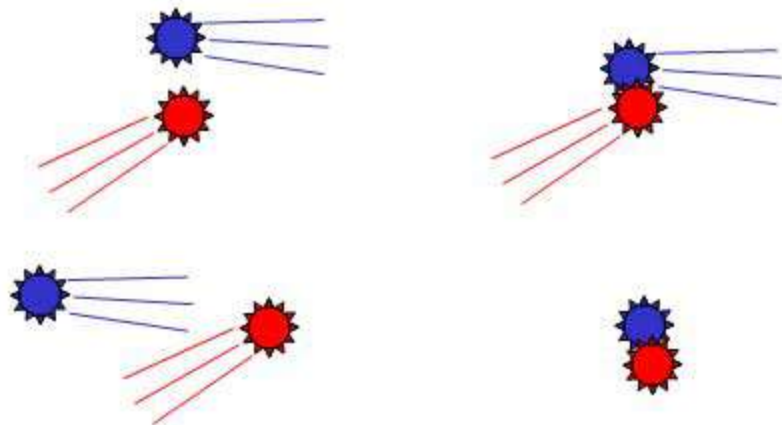


elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között

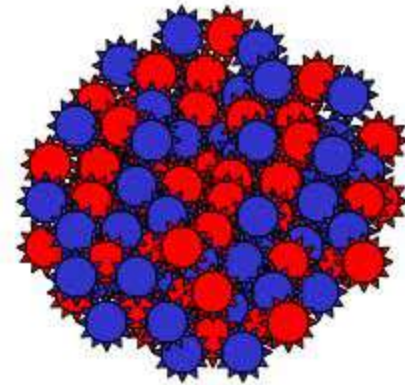




## „Bogánccsfizika”

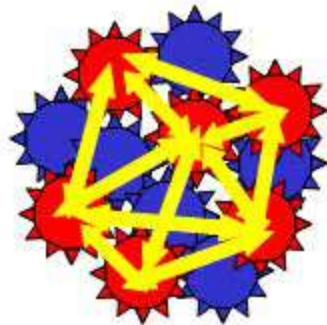


## Összetettebb atommag

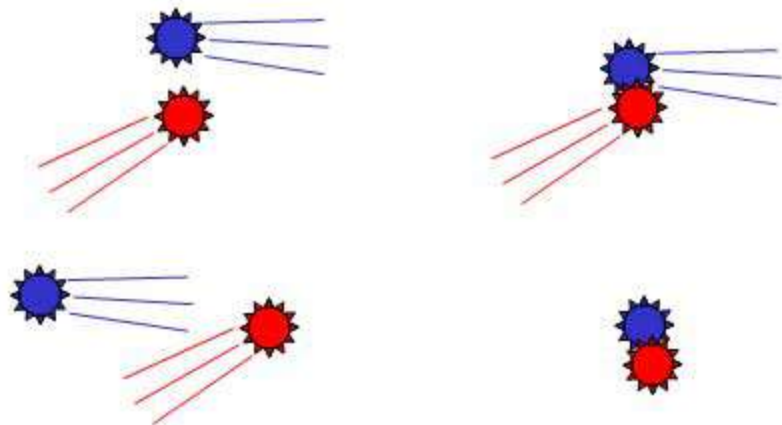


nagy bogánccsgömb

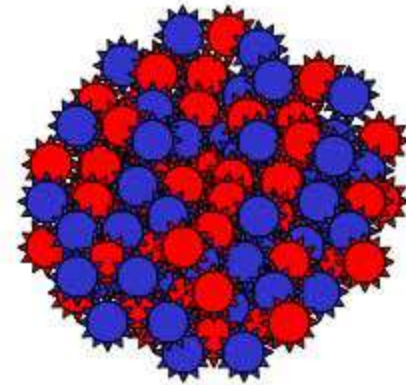
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



## „Bogánccsfizika”

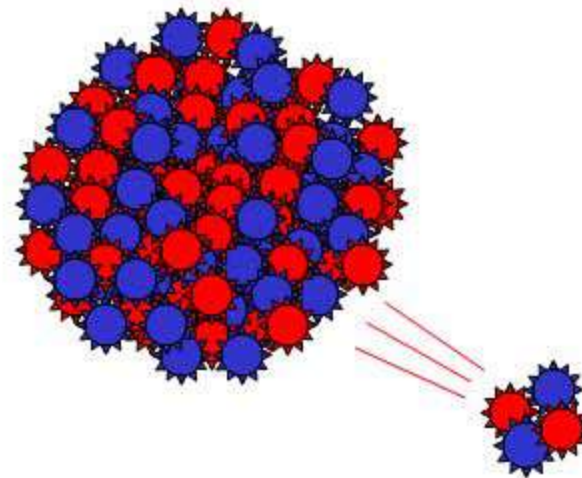
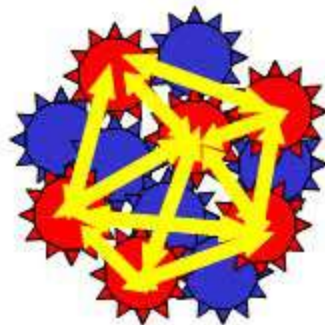


## Összetettebb atommag

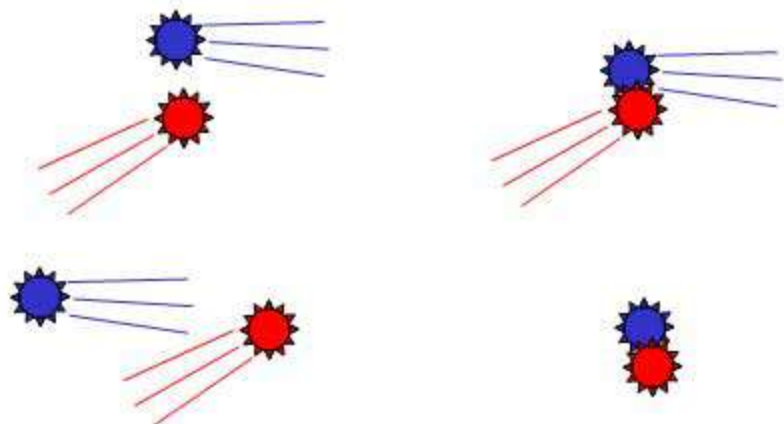


nagy bogánccsgömb

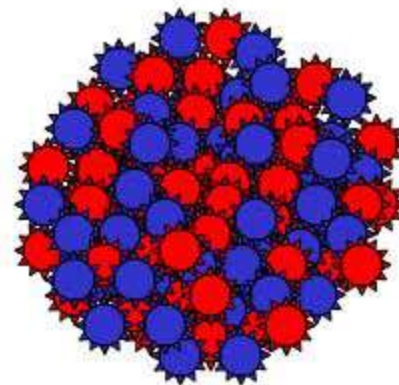
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



# „Bogáncofizika”

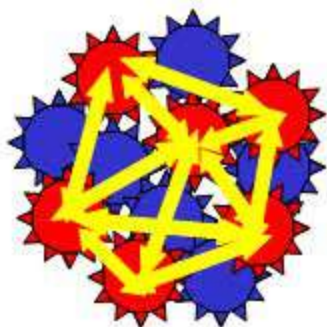


# Összetettebb atommag

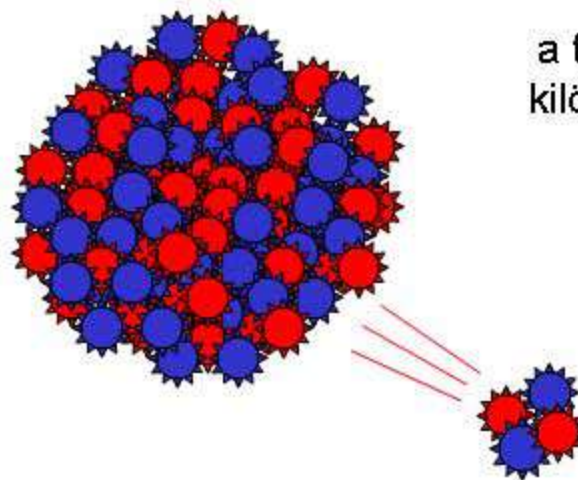


nagy bogánco gömb

elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



a túl nagy mag  
kilöki felesleges  
részeit



# Az atommagok térképe

protonok száma:  $Z$

- 2360  
2.34287 T  
α- 100.00%  
T<sub>1/2</sub> 9.42-0%
- STABIL MAG
- 1209  
2.04 s  
β+ 100.00%
- 30P  
11.07 s  
β- 100.00%
- 130  
0.67 MeV  
p
- 2702  
1 M  
spontán hasadás
- 20P  
0.40 s  
n

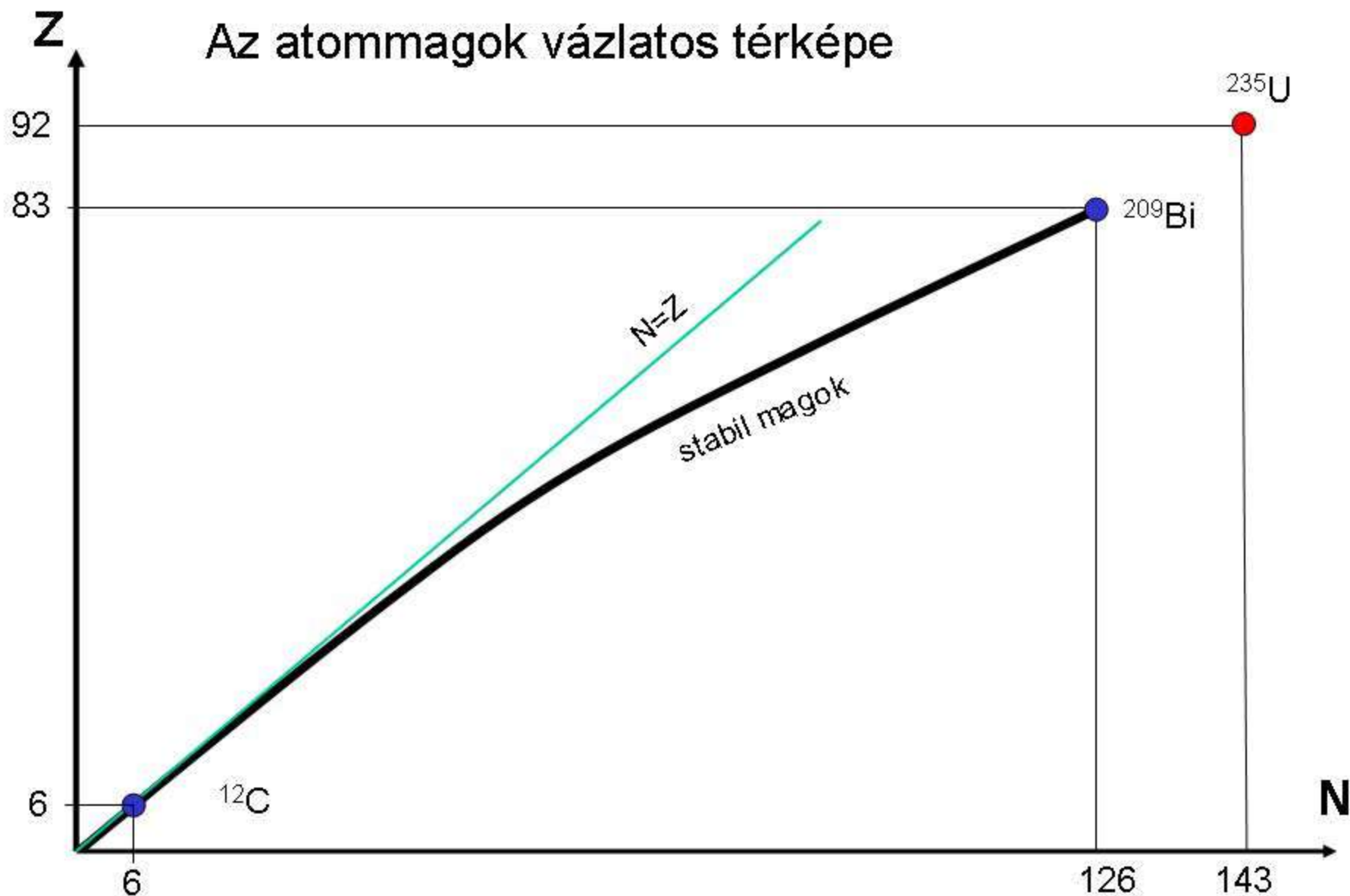
neutronok száma:  $N$



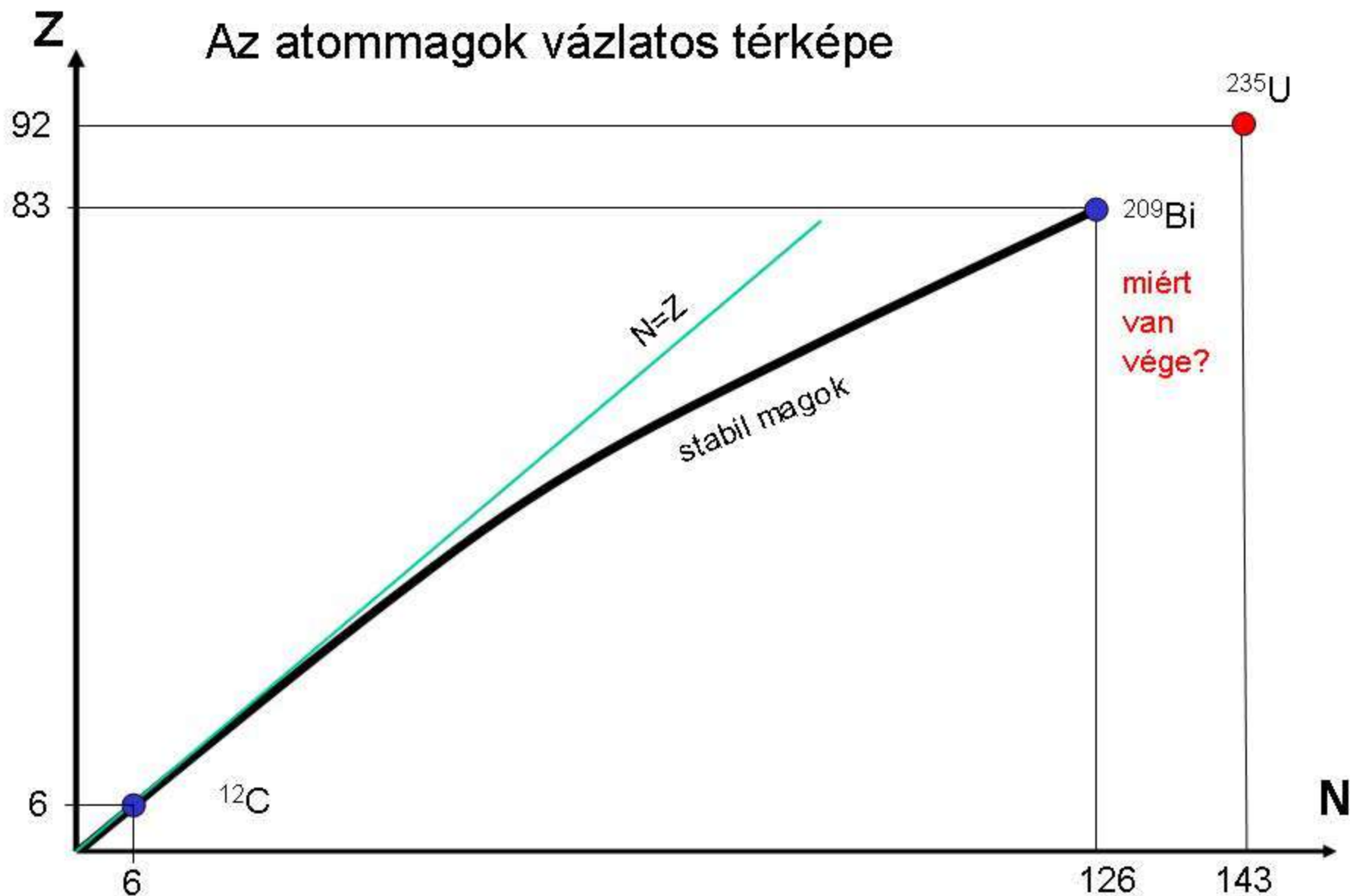
# Az atommagok vázlatos térképe



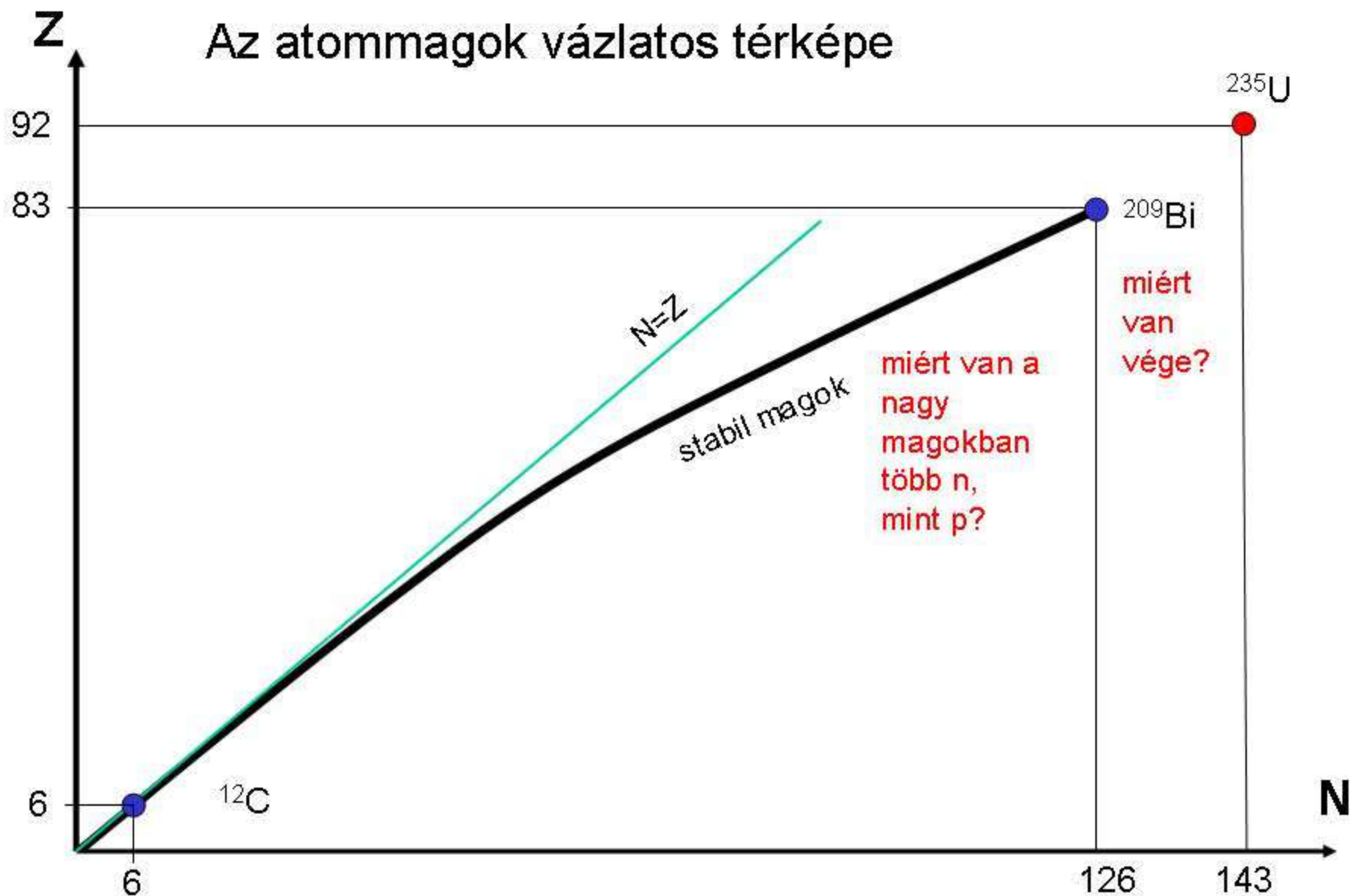
# Az atommagok vázlatos térképe



# Az atommagok vázlatos térképe

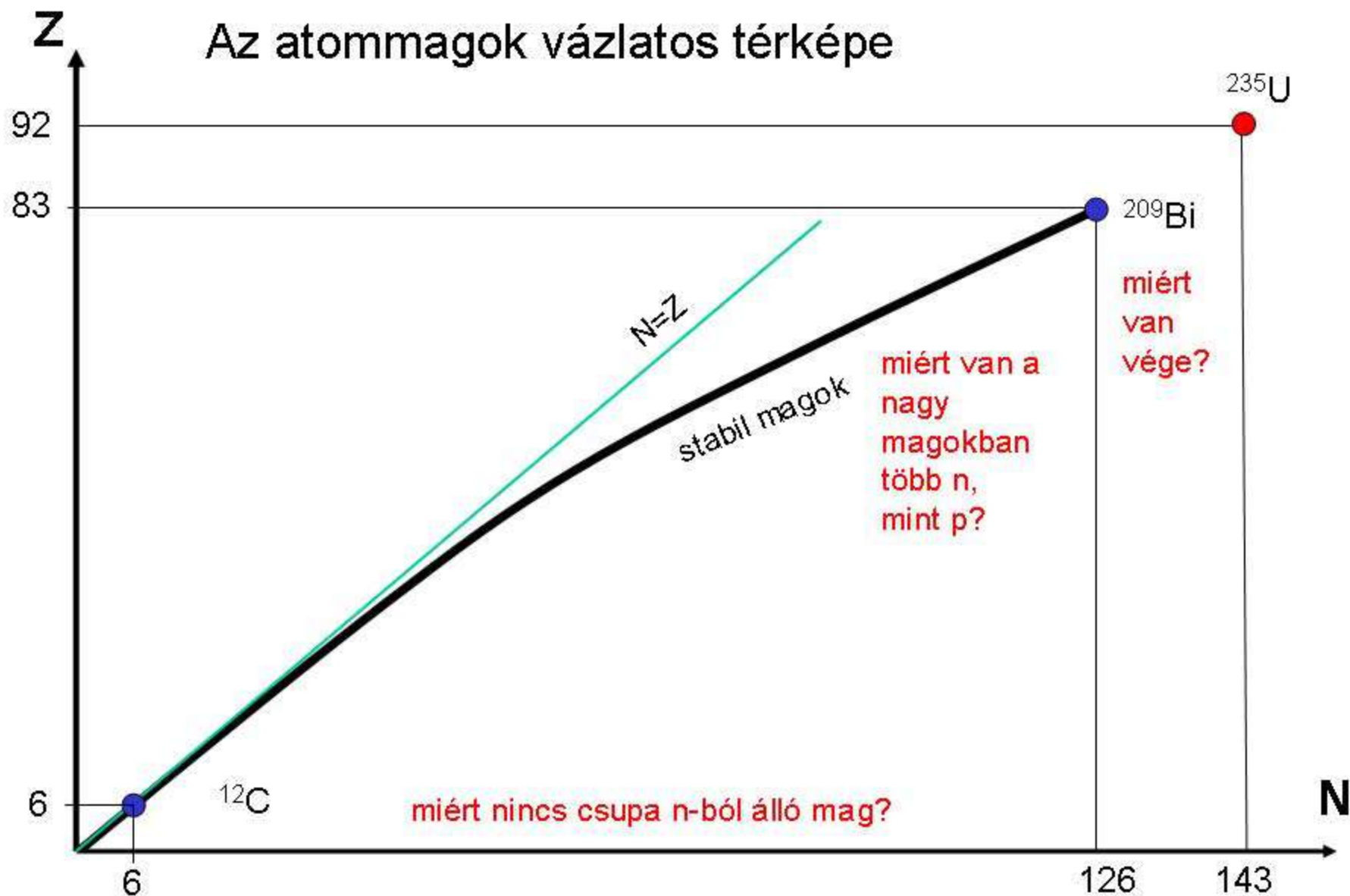


# Az atommagok vázlatos térképe



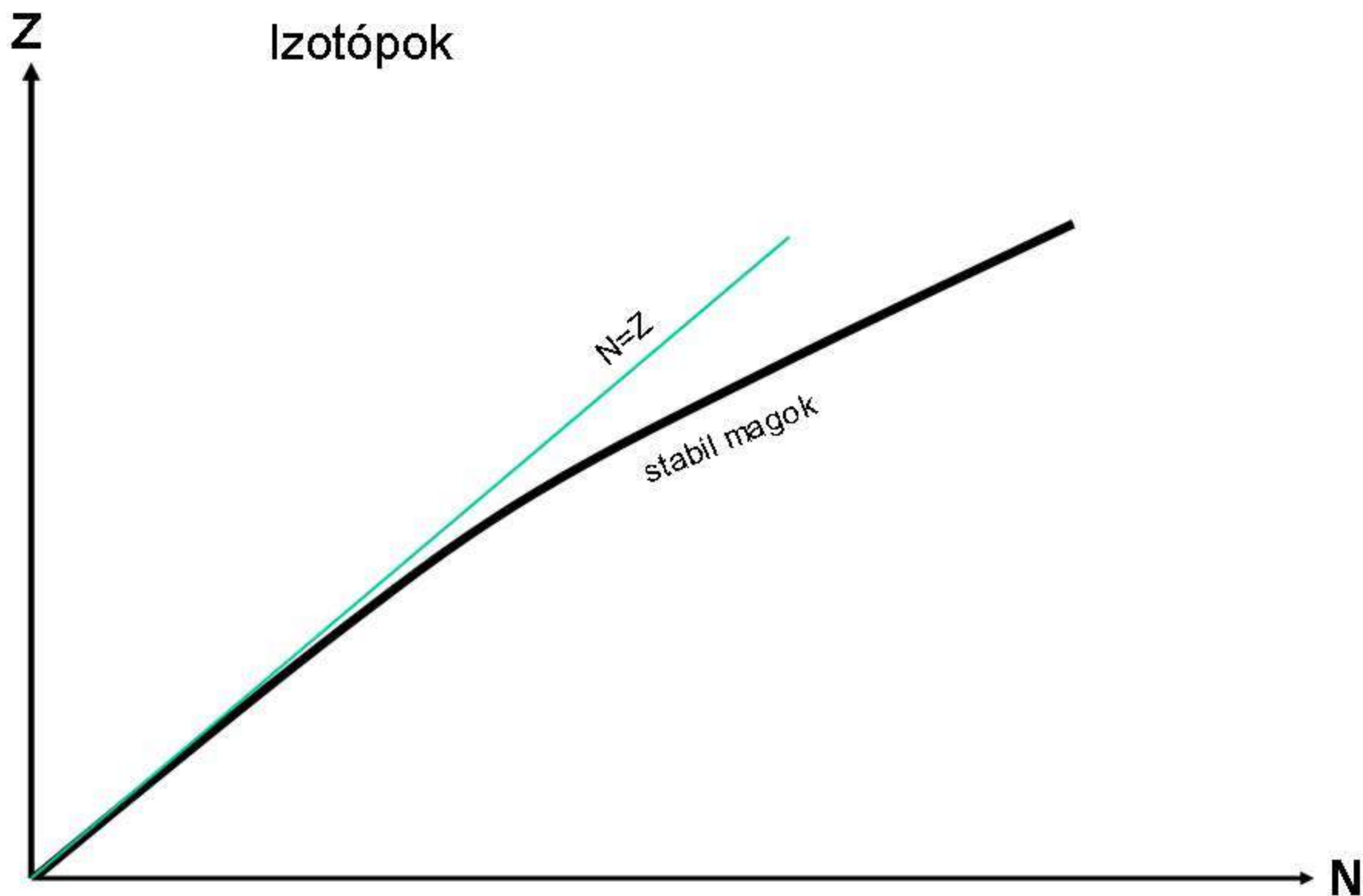


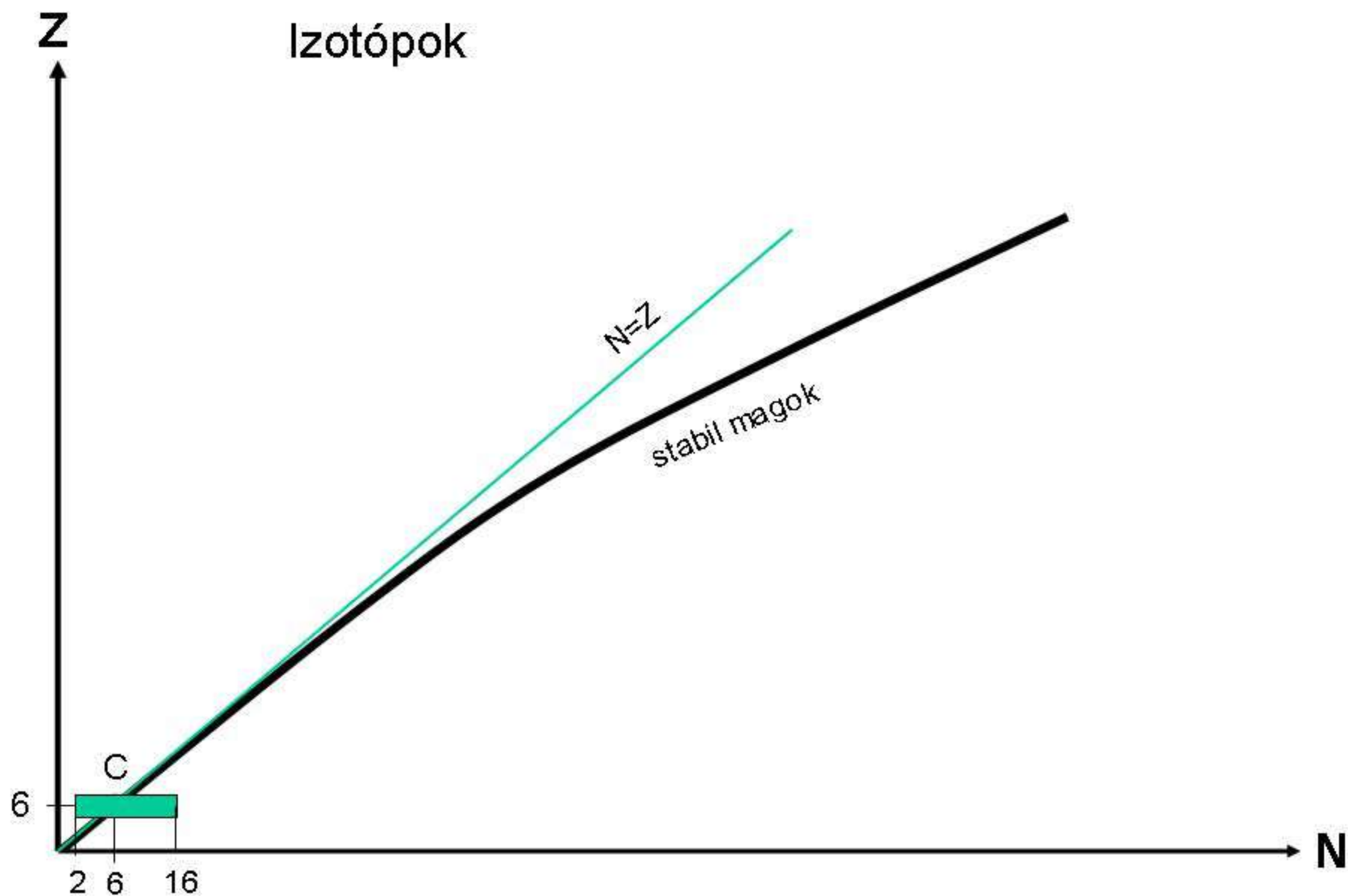
# Az atommagok vázlatos térképe



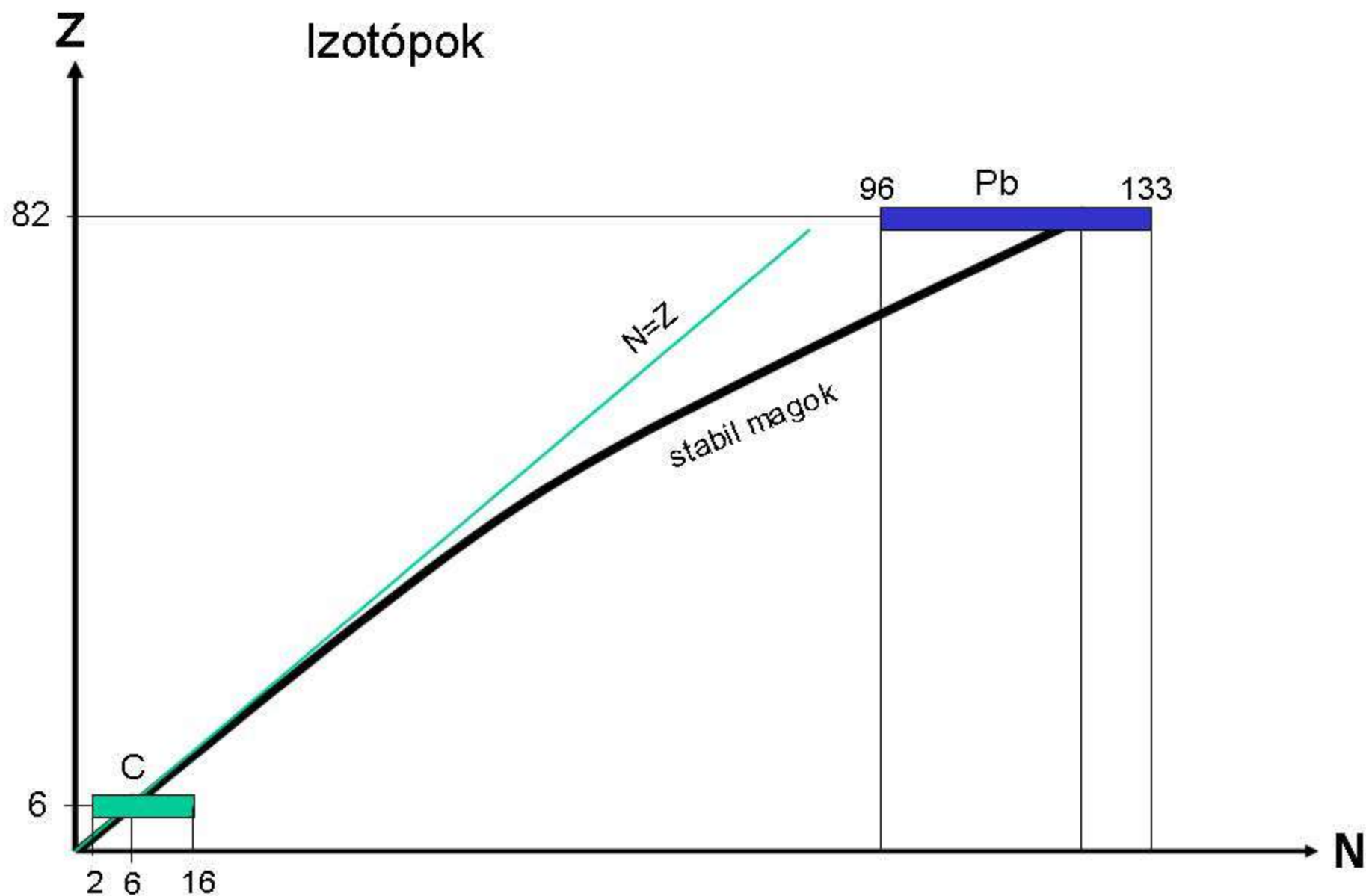
# Izotópok



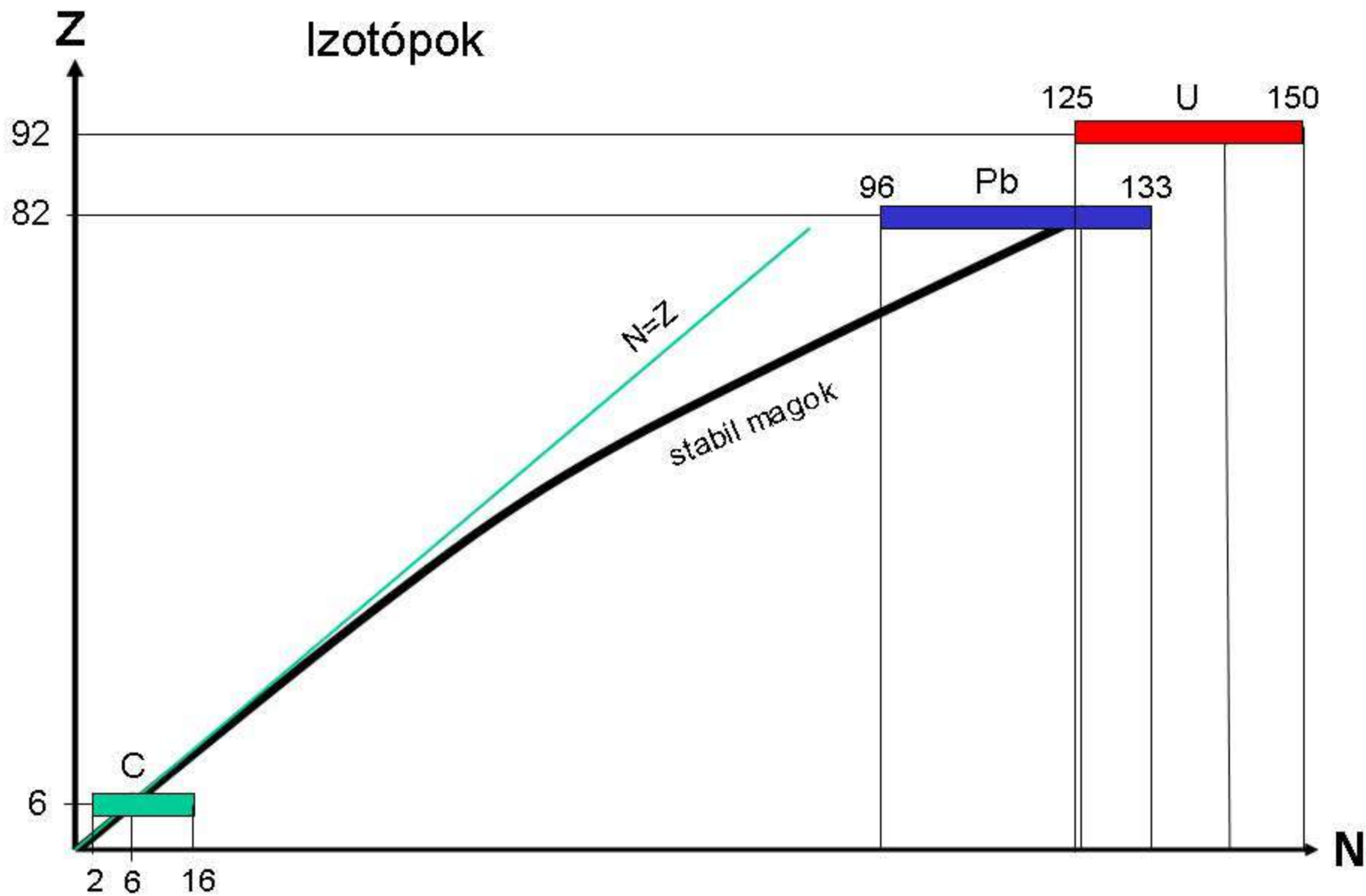




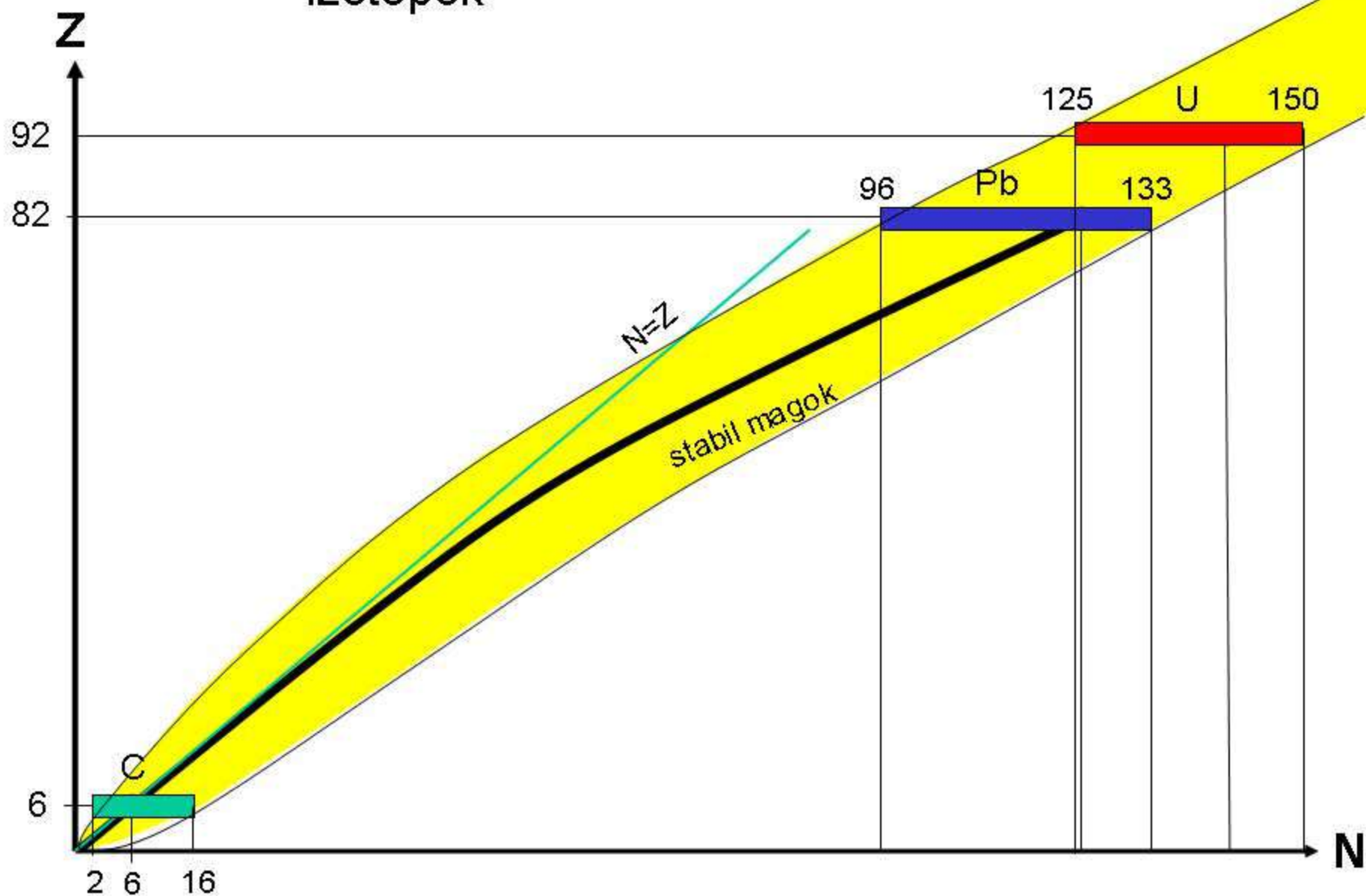
# Izotópok



# Izotópok

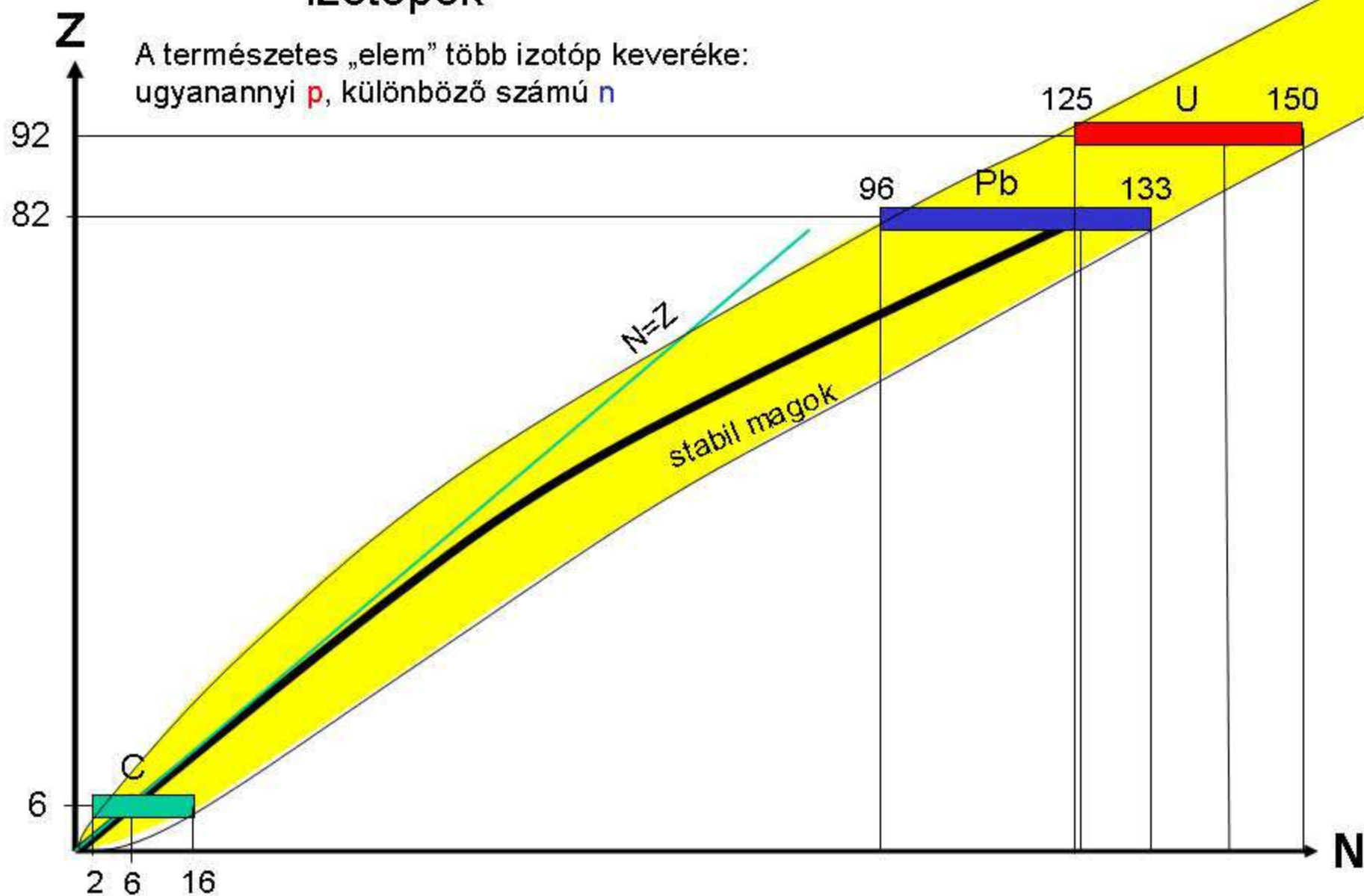


# Izotópok



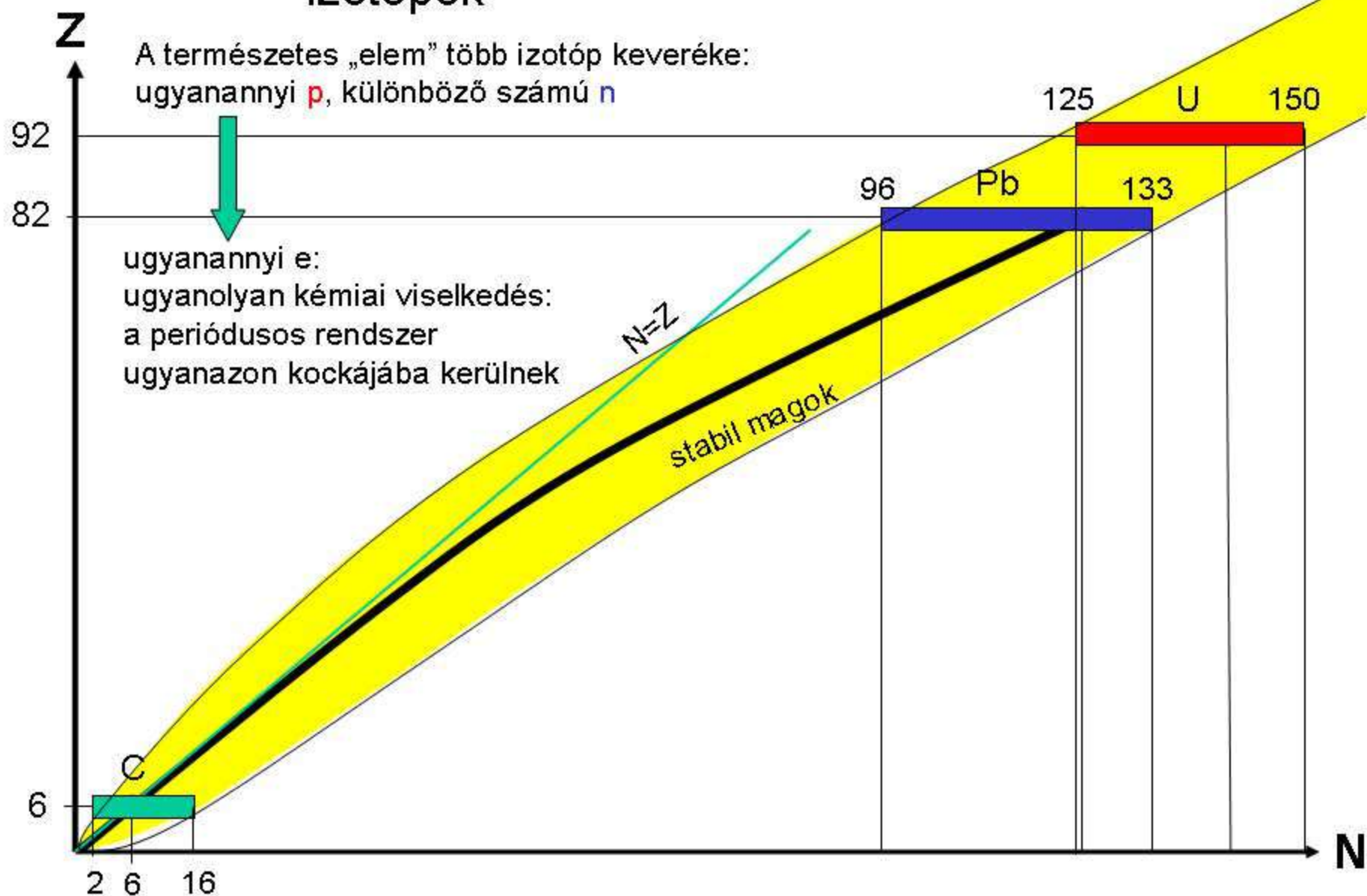
# Izotópok

A természetes „elem” több izotóp keveréke:  
ugyanannyi  $p$ , különböző számú  $n$





# Izotópok



# könnyű atommagok

$p = 6$

$p = 1$

$p = 0$



# Egy elem stabil izotóp nélkül: a prométium

145Tb = 20 M α	146Tb 8 s α	147Tb 1.7 H α	148Tb 60 M α	149Tb 4.118 H α	150Tb 3.48 H α	151Tb 17.609 H α	152Tb 17.5 H α	153Tb 2.34 D α	154Tb 21.5 H β-	155Tb 5.32 D α	156Tb 5.35 D α	157Tb 71 Y α	158Tb 180 Y β-	159Tb STABLE 100%
144Gd 4.47 M α	145Gd 23.0 M α	146Gd 48.27 D α	147Gd 38.06 H α	148Gd 70.9 Y α	149Gd 9.28 D α	150Gd 1.79E+6 Y α	151Gd 124 D α	152Gd 1.06E+14 Y 0.20% α	153Gd 240.4 D α	154Gd STABLE 2.18%	155Gd STABLE 14.80%	156Gd STABLE 20.47%	157Gd STABLE 15.65%	158Gd STABLE 24.84%
143Eu 2.59 M α	144Eu 10.2 s α	145Eu 5.93 D α	146Eu 4.61 D α	147Eu 24.1 D α	148Eu 54.5 D α	149Eu 93.1 D α	150Eu 36.9 Y α	151Eu STABLE 47.81%	152Eu 13.506 Y β-	153Eu STABLE 52.19%	154Eu 8.590 Y β-	155Eu 4.753 Y β-	156Eu 15.19 D β-	157Eu 15.18 H β-
142Sm 72.49 M α	143Sm 8.75 M α	144Sm STABLE 3.07%	145Sm 340 D α	146Sm 10.3E+7 Y α	147Sm 1.06E+11 Y 14.99% α	148Sm 7E+15 Y 11.24% α	149Sm STABLE 13.82%	150Sm STABLE 7.38%	151Sm 90 Y β-	152Sm STABLE 26.75%	153Sm 46.284 H β-	154Sm STABLE 22.75%	155Sm 22.3 M β-	156Sm 9.4 H β-
141Pm 20.90 M α	142Pm 40.5 s α	143Pm 265 D α	144Pm 363 D α	145Pm 17.7 Y α	146Pm 5.53 Y β-	147Pm 2.6234 Y β-	148Pm 5.368 D β-	149Pm 53.08 H β-	150Pm 2.68 H β-	151Pm 28.40 H β-	152Pm 4.12 M β-	153Pm 5.25 M β-	154Pm 2.68 M β-	155Pm 41.5 s β-
140Nd 3.37 D α	141Nd 2.49 H α	142Nd STABLE 27.2%	143Nd STABLE 12.2%	144Nd 2.29E+15 Y 23.8% α	145Nd STABLE 8.3%	146Nd STABLE 17.2%	147Nd 10.98 D β-	148Nd STABLE 5.7%	149Nd 1.728 H β-	150Nd 0.79E+19 Y 5.8% 2β-	151Nd 12.44 M β-	152Nd 11.4 M β-	153Nd 31.6 s β-	154Nd 25.9 s β-
139Pr 4.41 H α	140Pr 3.39 M α	141Pr STABLE 100%	142Pr 19.12 H β-	143Pr 13.57 D β-	144Pr 17.28 M β-	145Pr 5.984 H β-	146Pr 24.15 M β-	147Pr 13.4 M β-	148Pr 2.29 M β-	149Pr 2.26 M β-	150Pr 6.19 s β-	151Pr 18.90 s β-	152Pr 3.63 s β-	153Pr 4.28 s β-
138Ce α 0.9E+14 Y 0.251% 2α	139Ce 137.641 D α	140Ce STABLE 88.450%	141Ce 32.508 D β-	142Ce > 2.6E+17 Y 11.114% 2β-	143Ce 33.039 H β-	144Ce 284.91 D β-	145Ce 3.01 M β-	146Ce 13.52 M β-	147Ce 56.4 s β-	148Ce 56 s β-	149Ce 5.3 s β-	150Ce 4.0 s β-	151Ce 1.62 s β-	152Ce 1.4 s β-

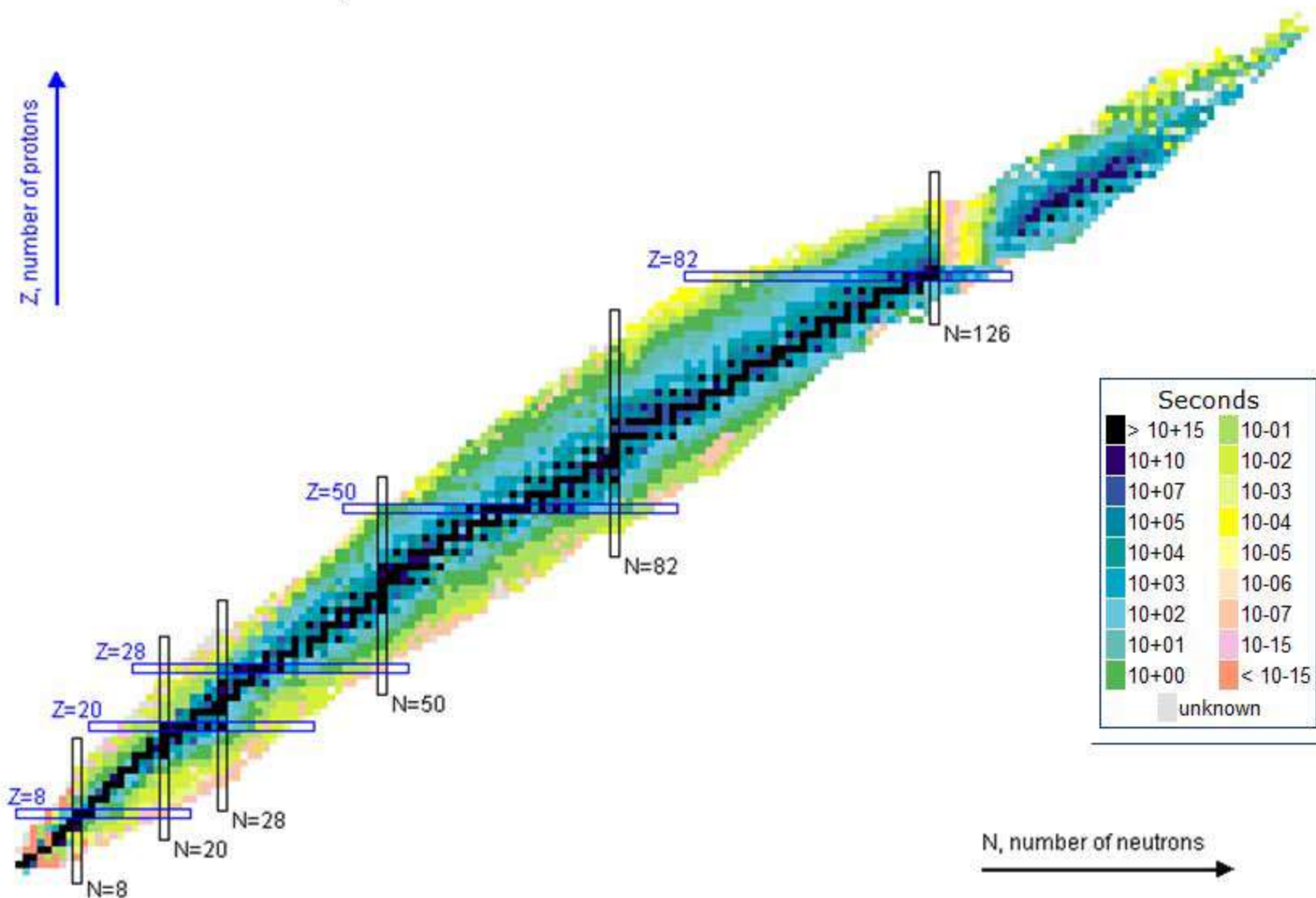
p = 61



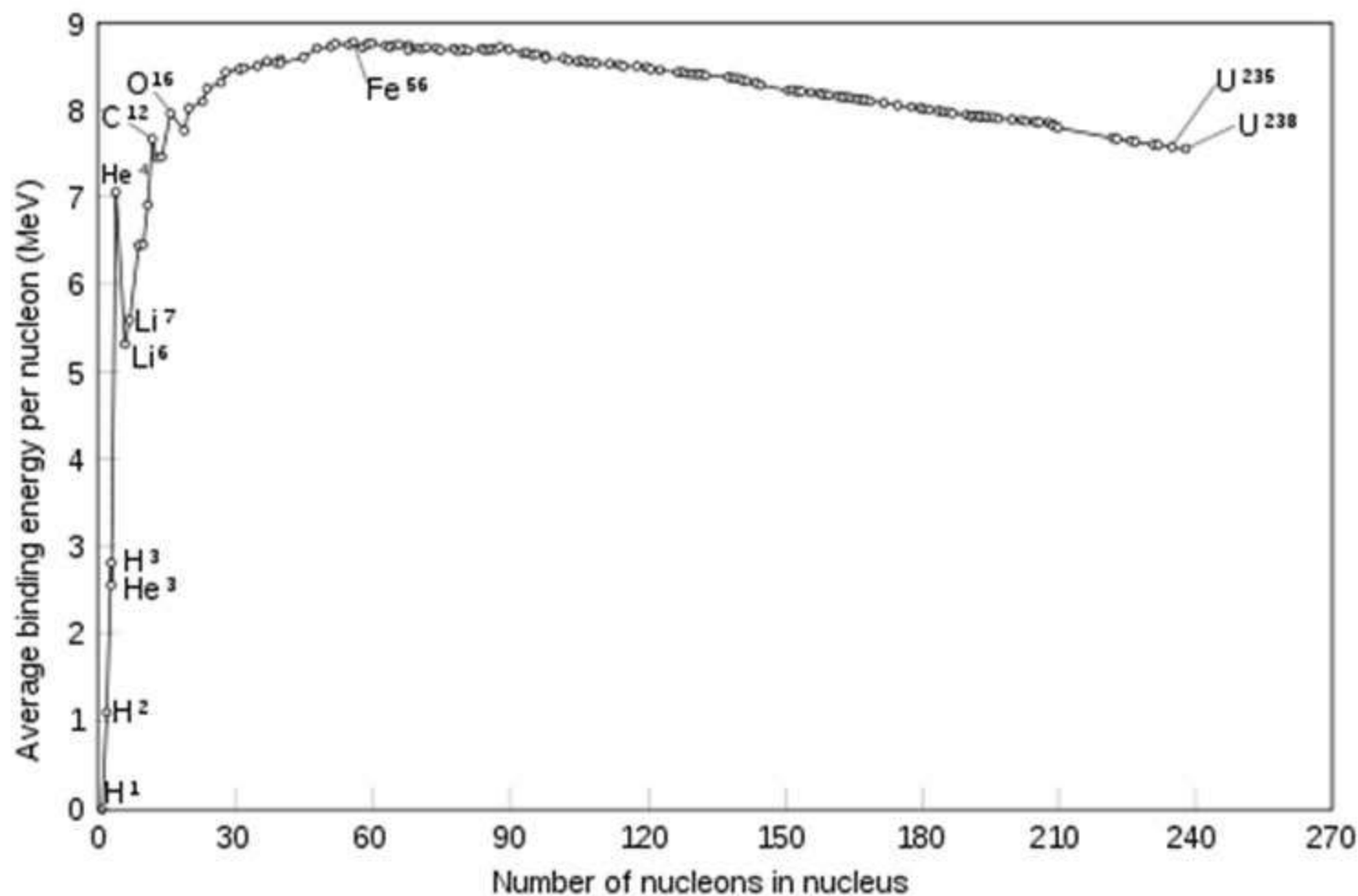
# Az ólomtól az uránig



# Az izotópok élettartama



# Az atommagok kötési energiája: a „szétszedésükhöz” szükséges energia

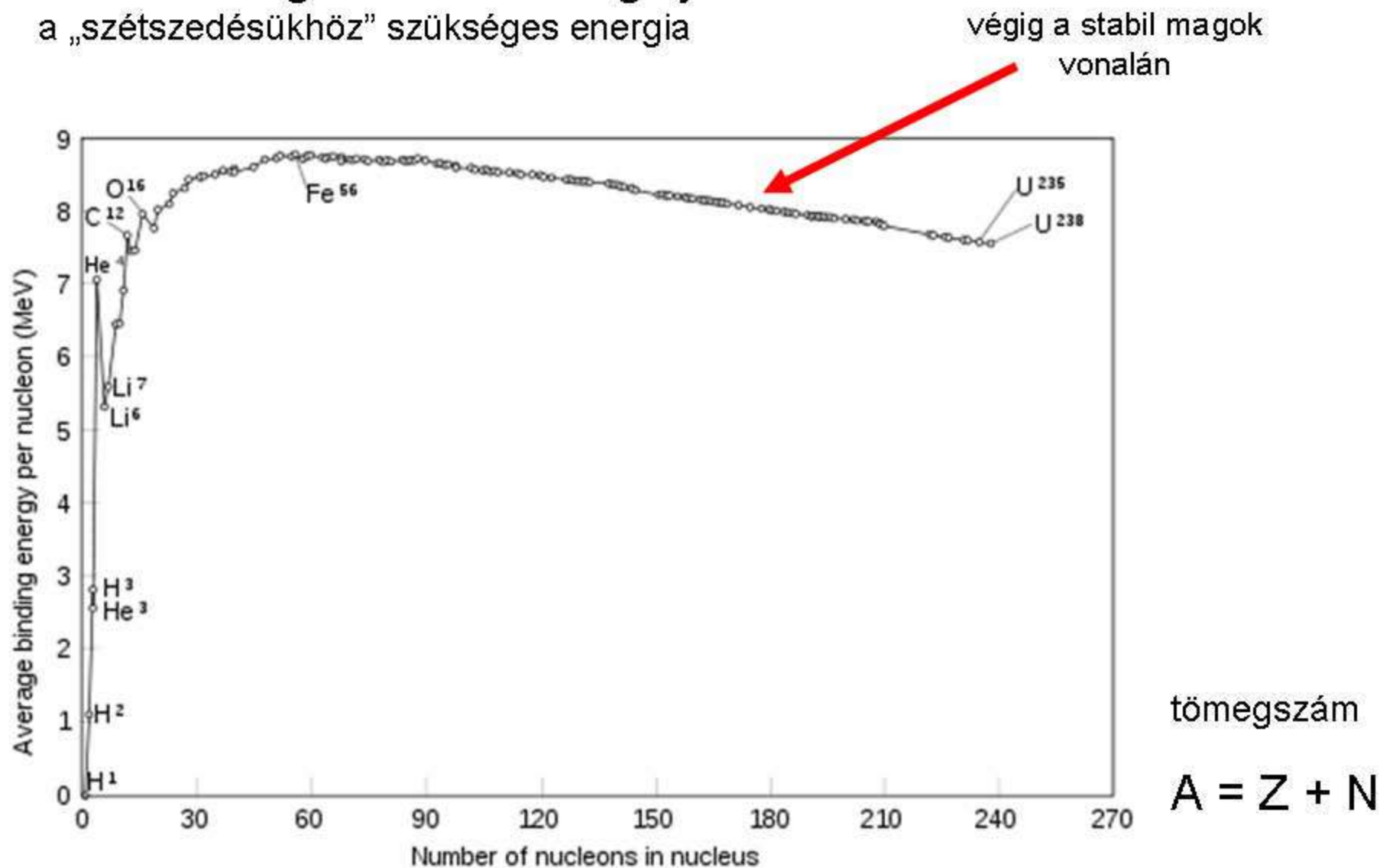


tömegszám

$$A = Z + N$$



# Az atommagok kötési energiája: a „szétszedésükhöz” szükséges energia

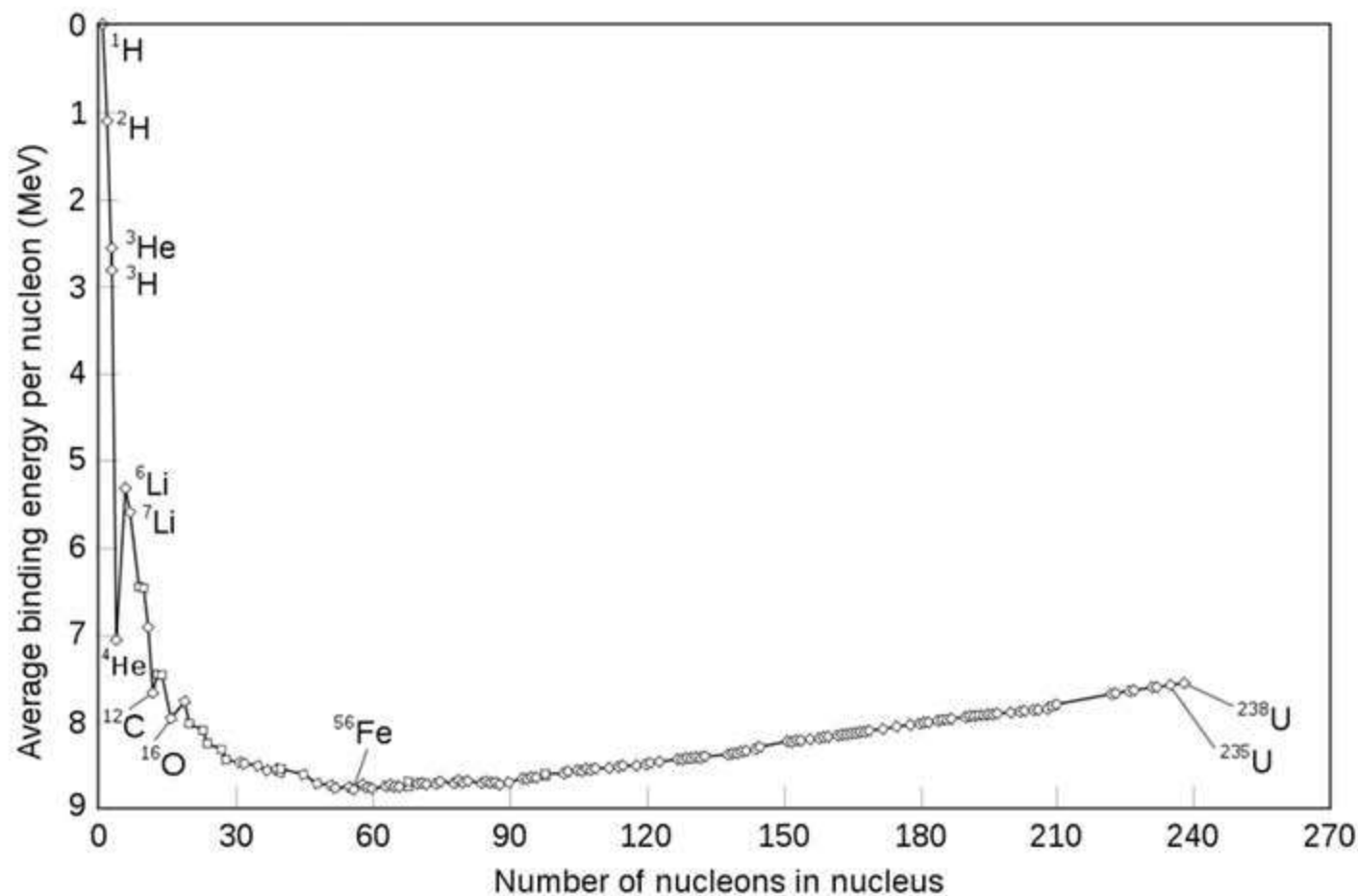


# A nukleáris völgy





# A nukleáris völgy

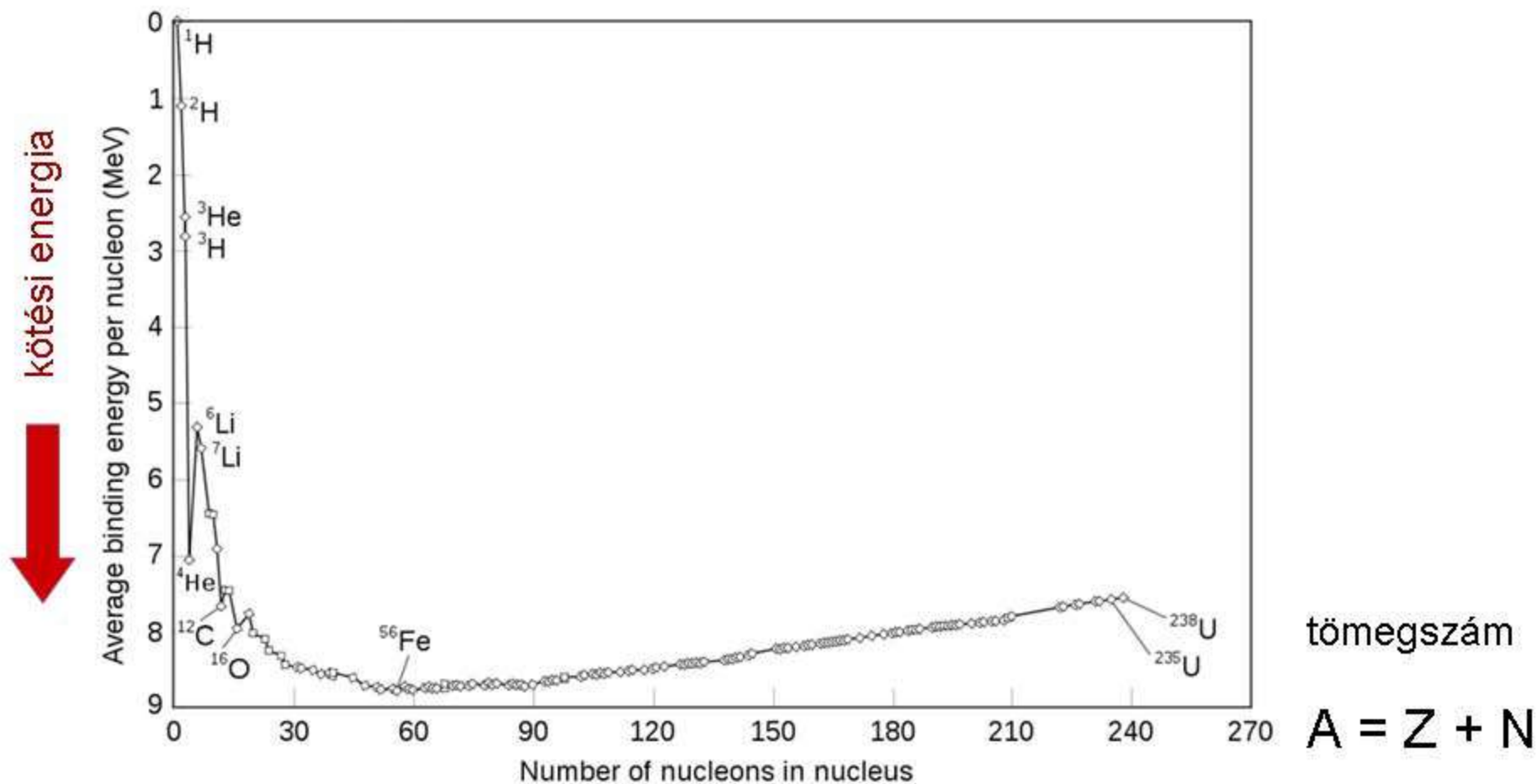


tömegszám

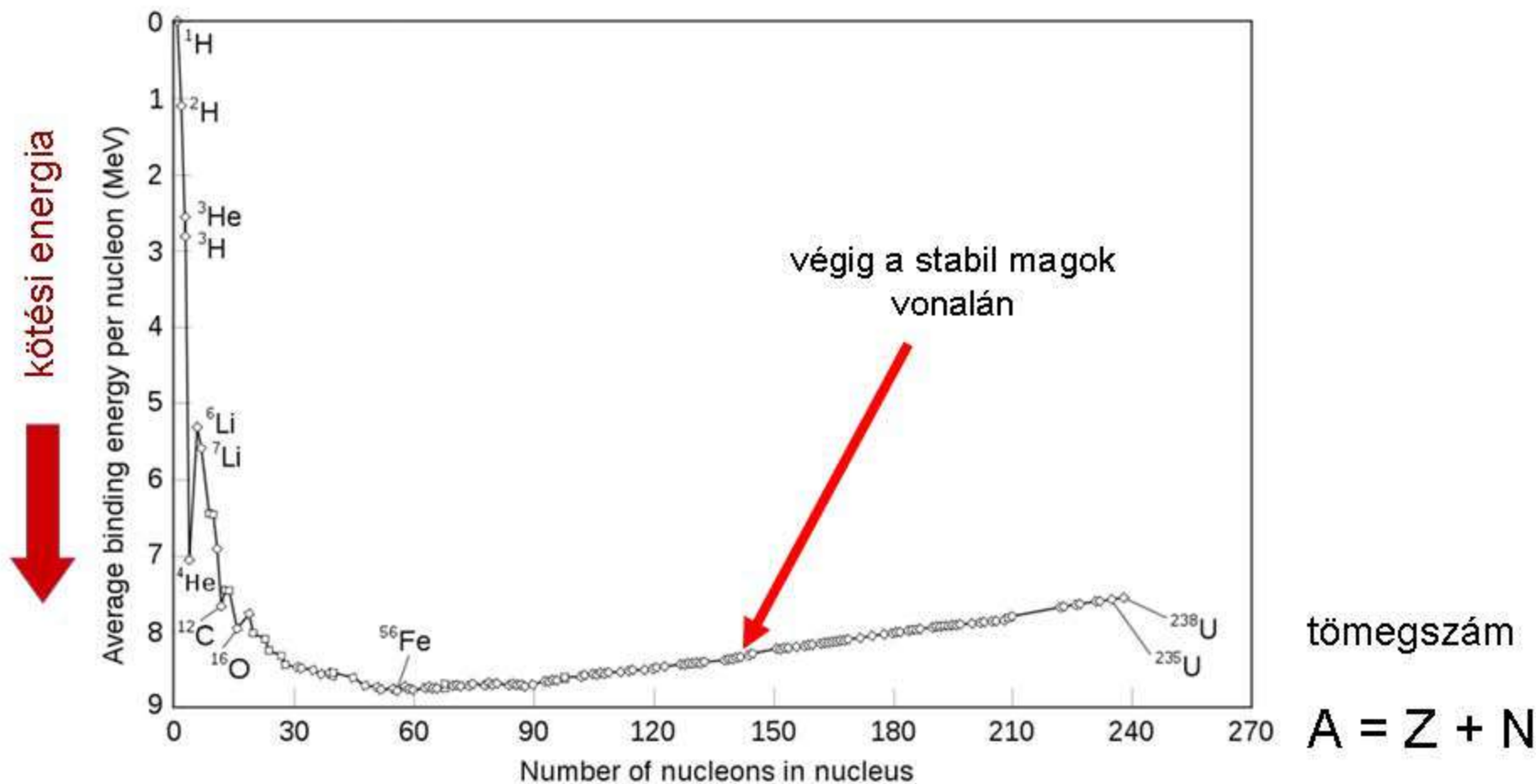
$$A = Z + N$$



# A nukleáris völgy



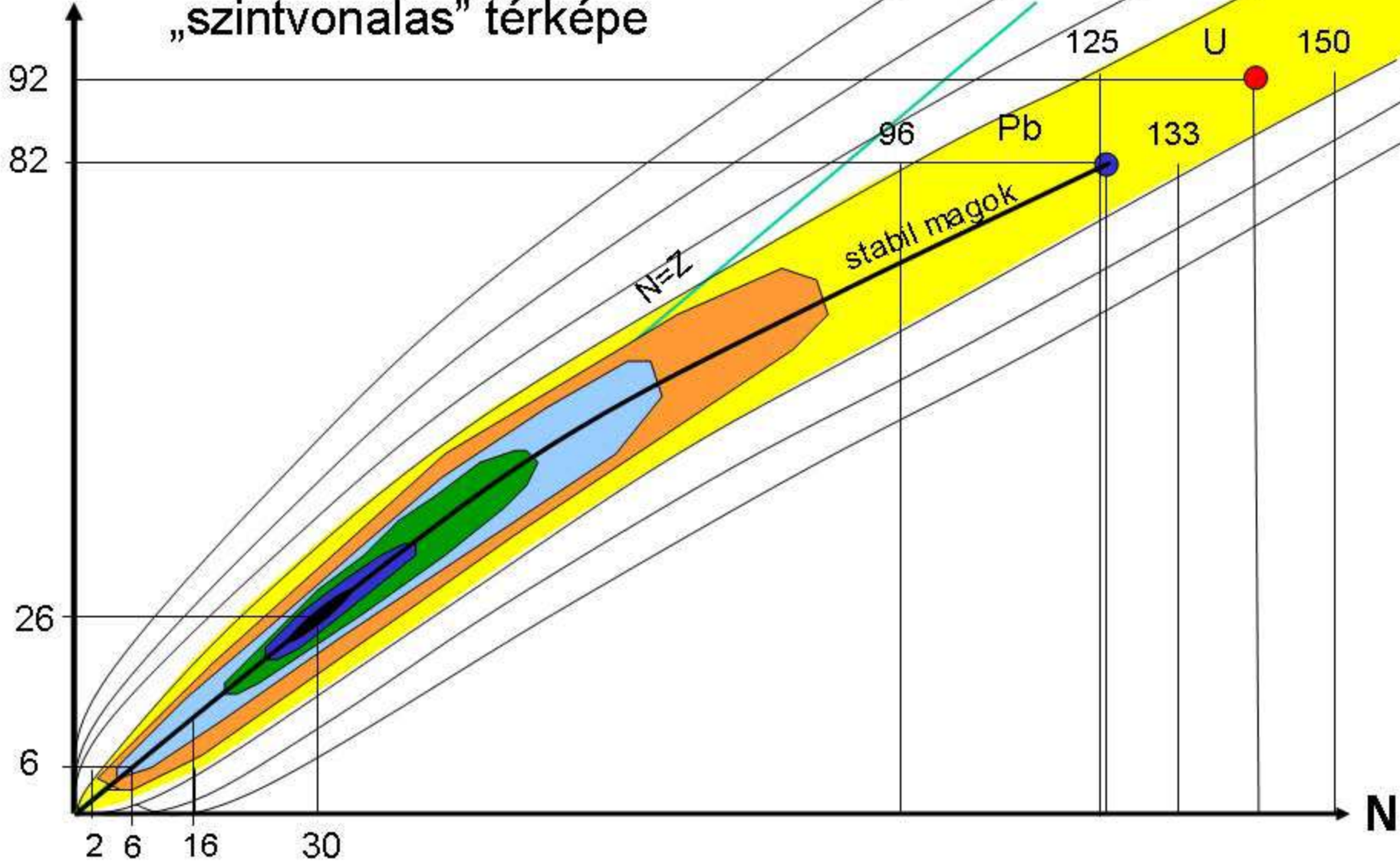
# A nukleáris völgy



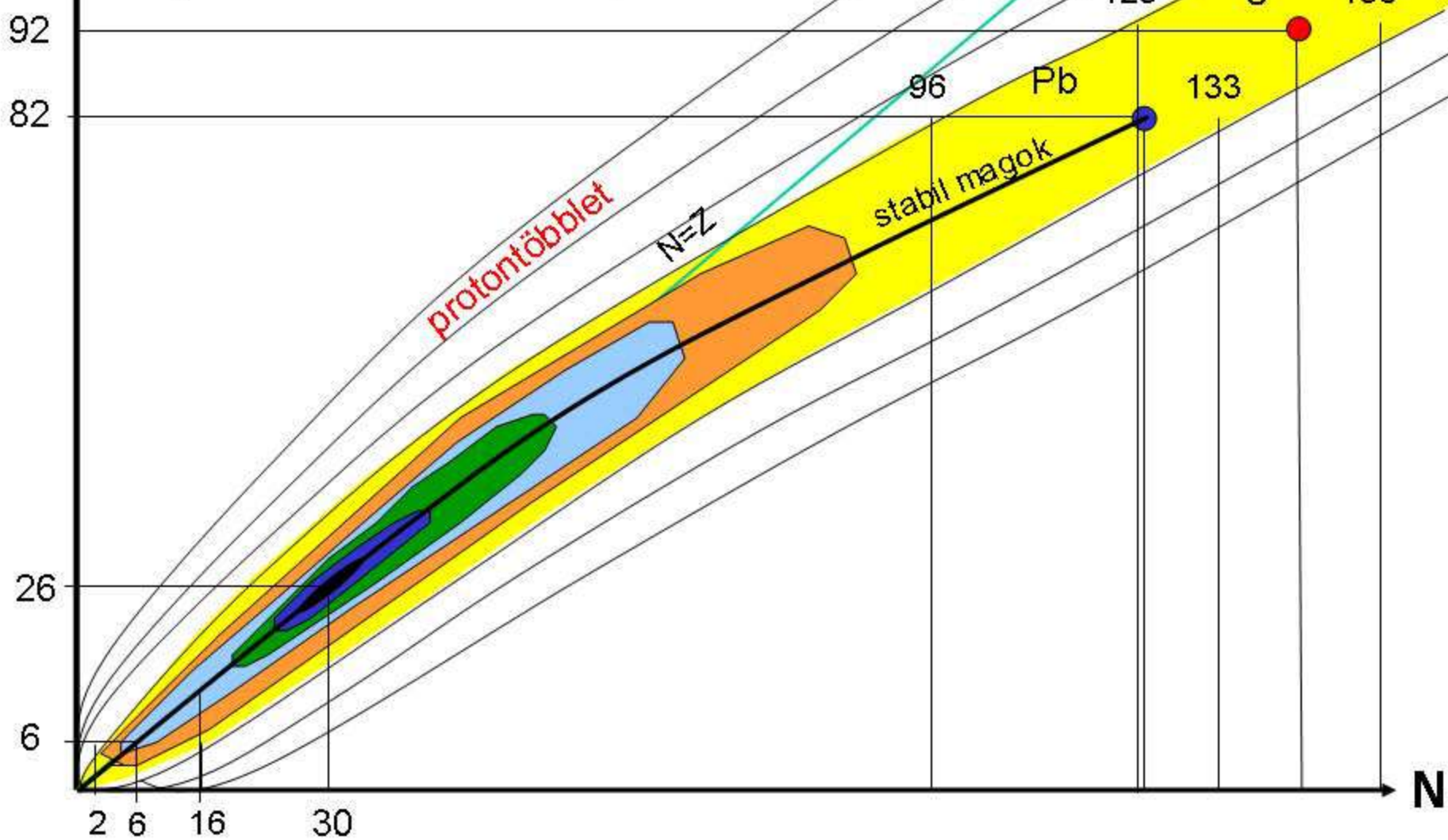
# A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe



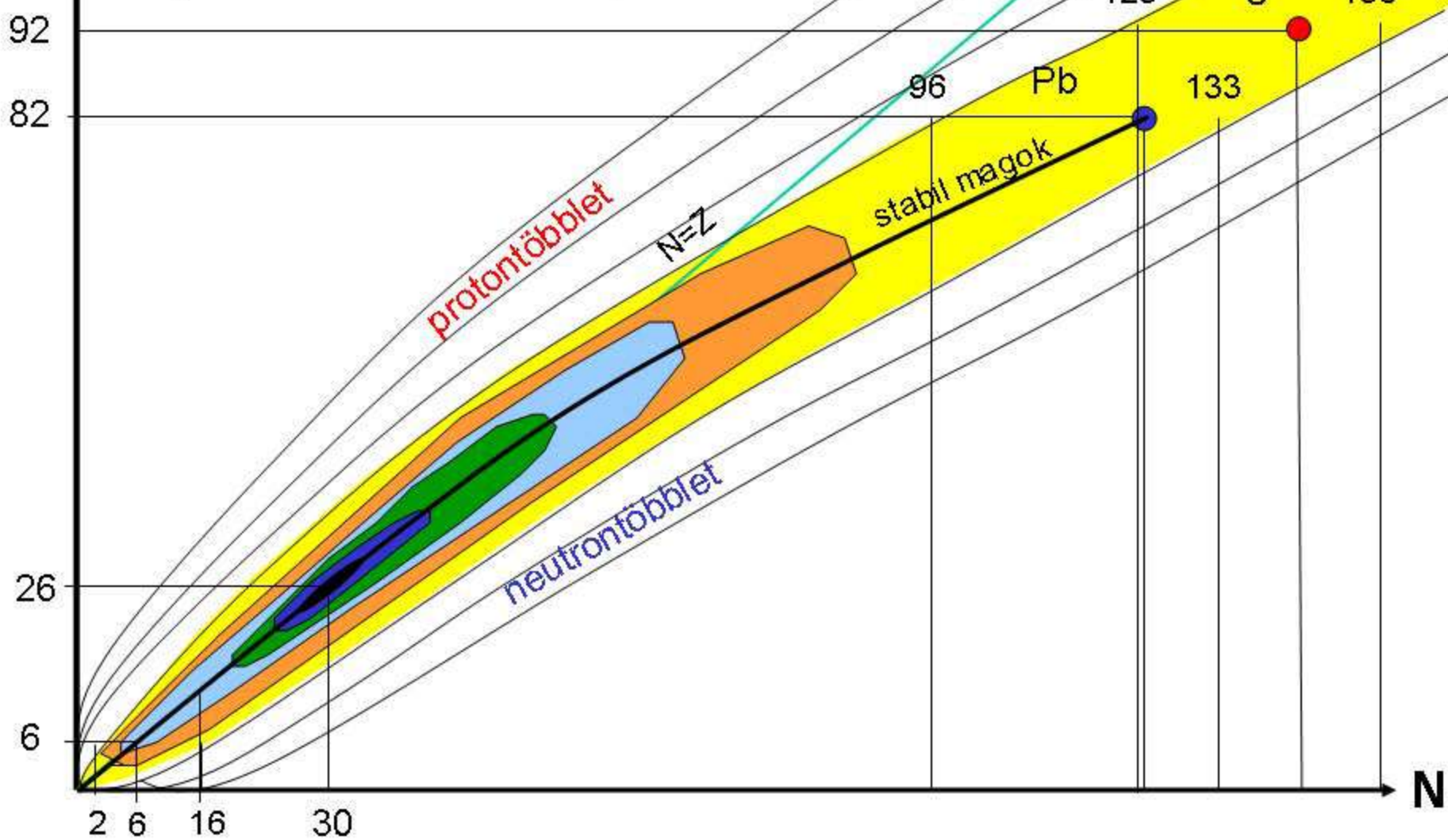
# A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe



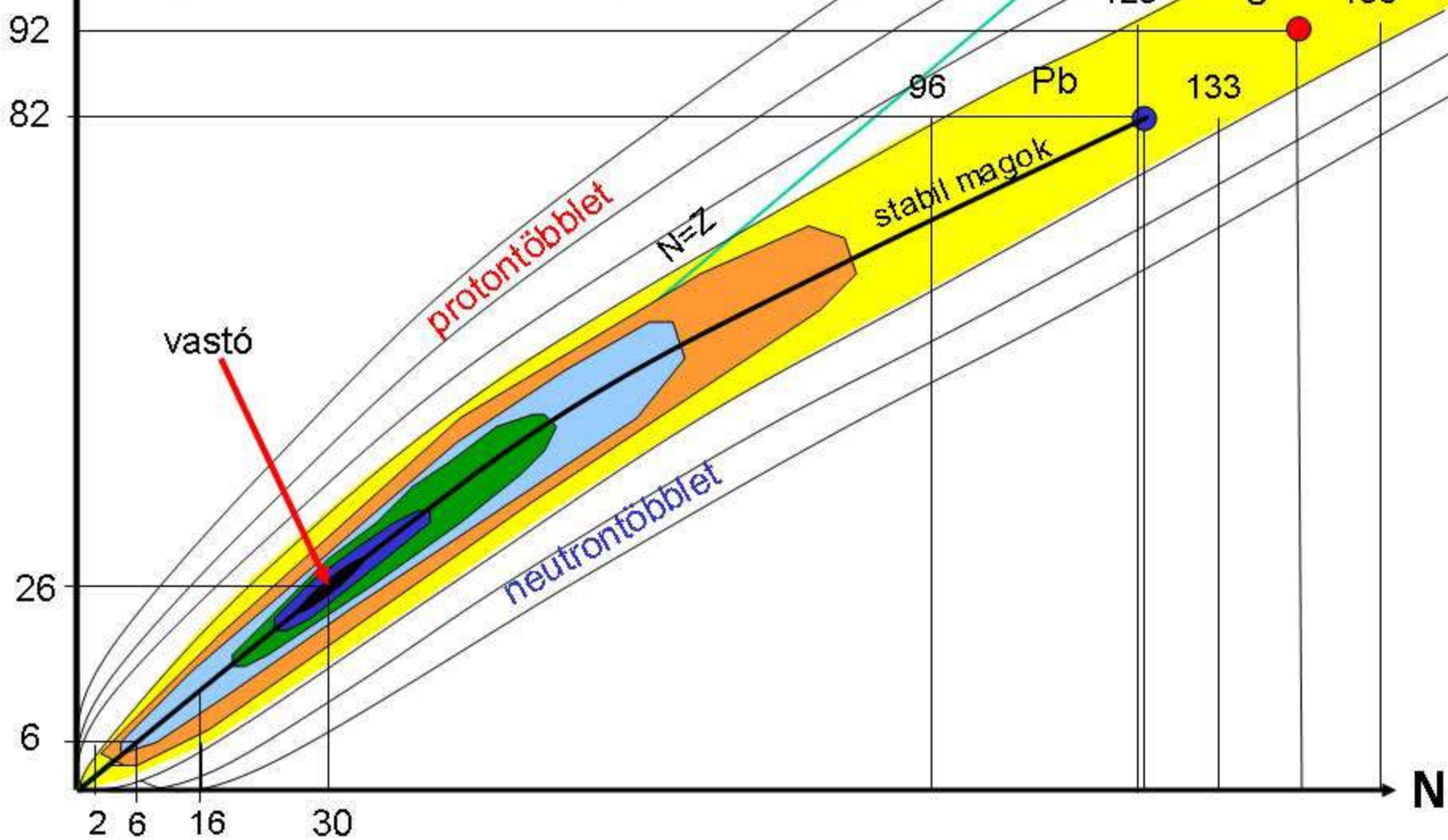
# A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe



# A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe

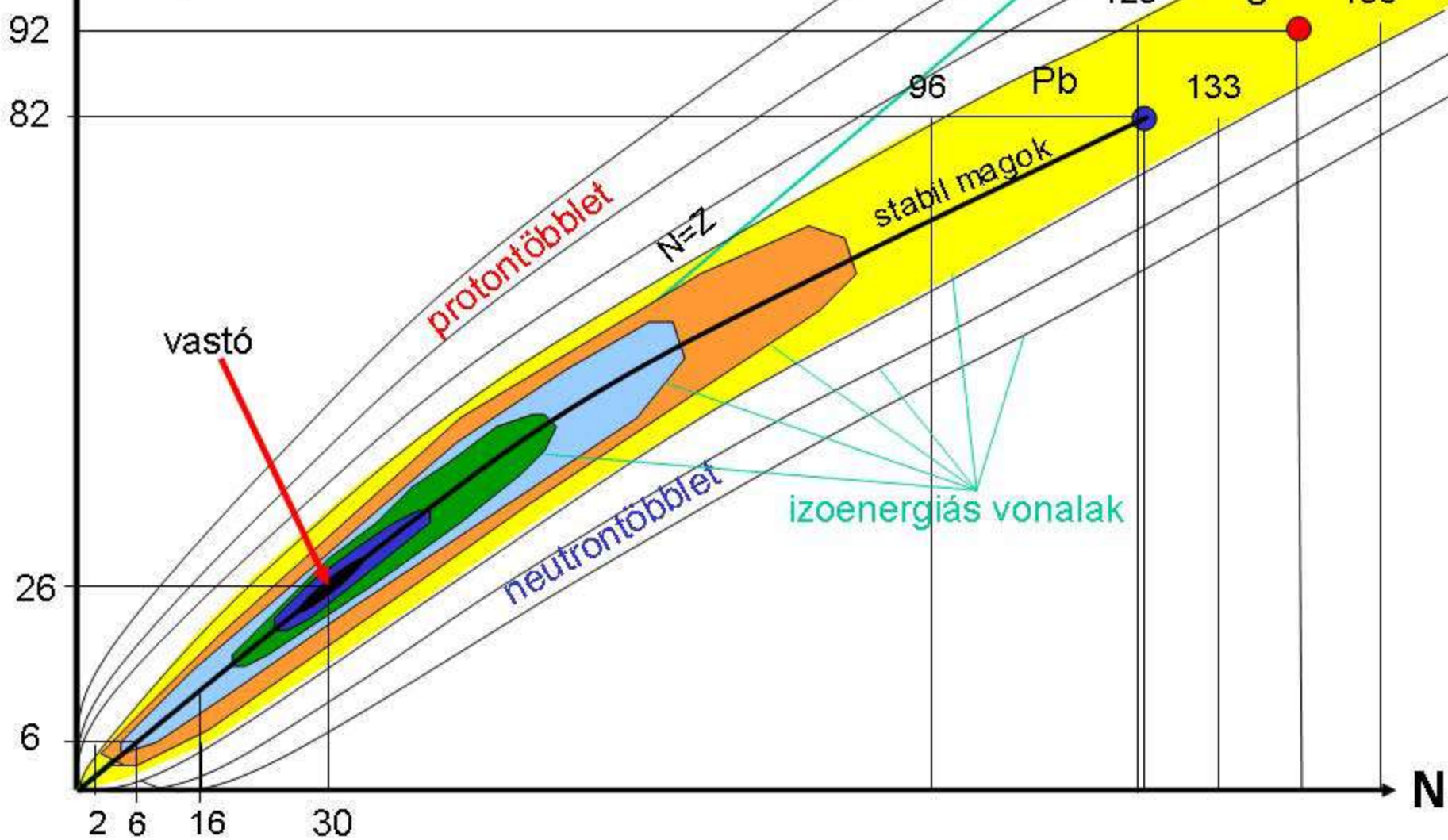


# A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe

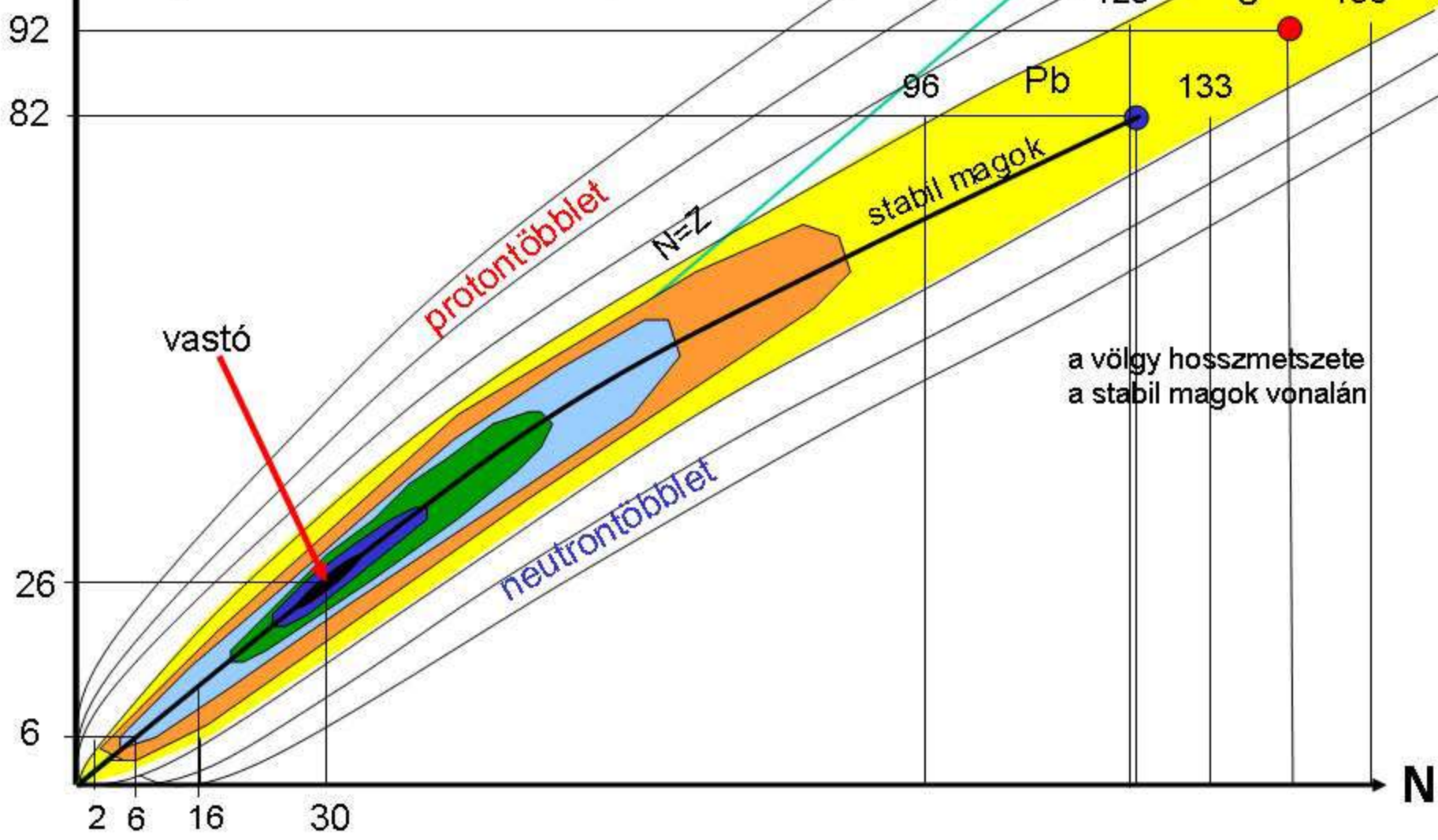




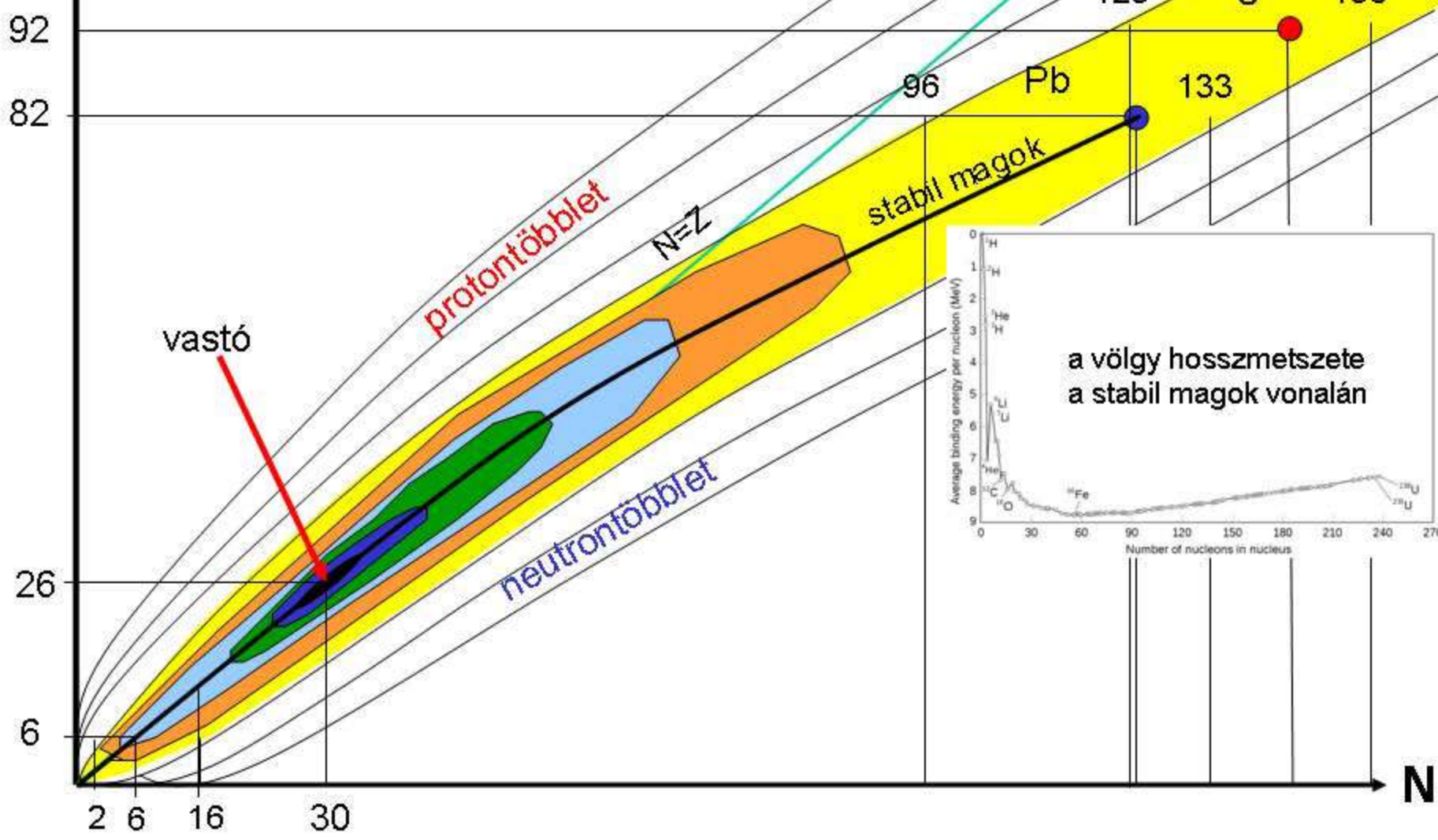
# A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe



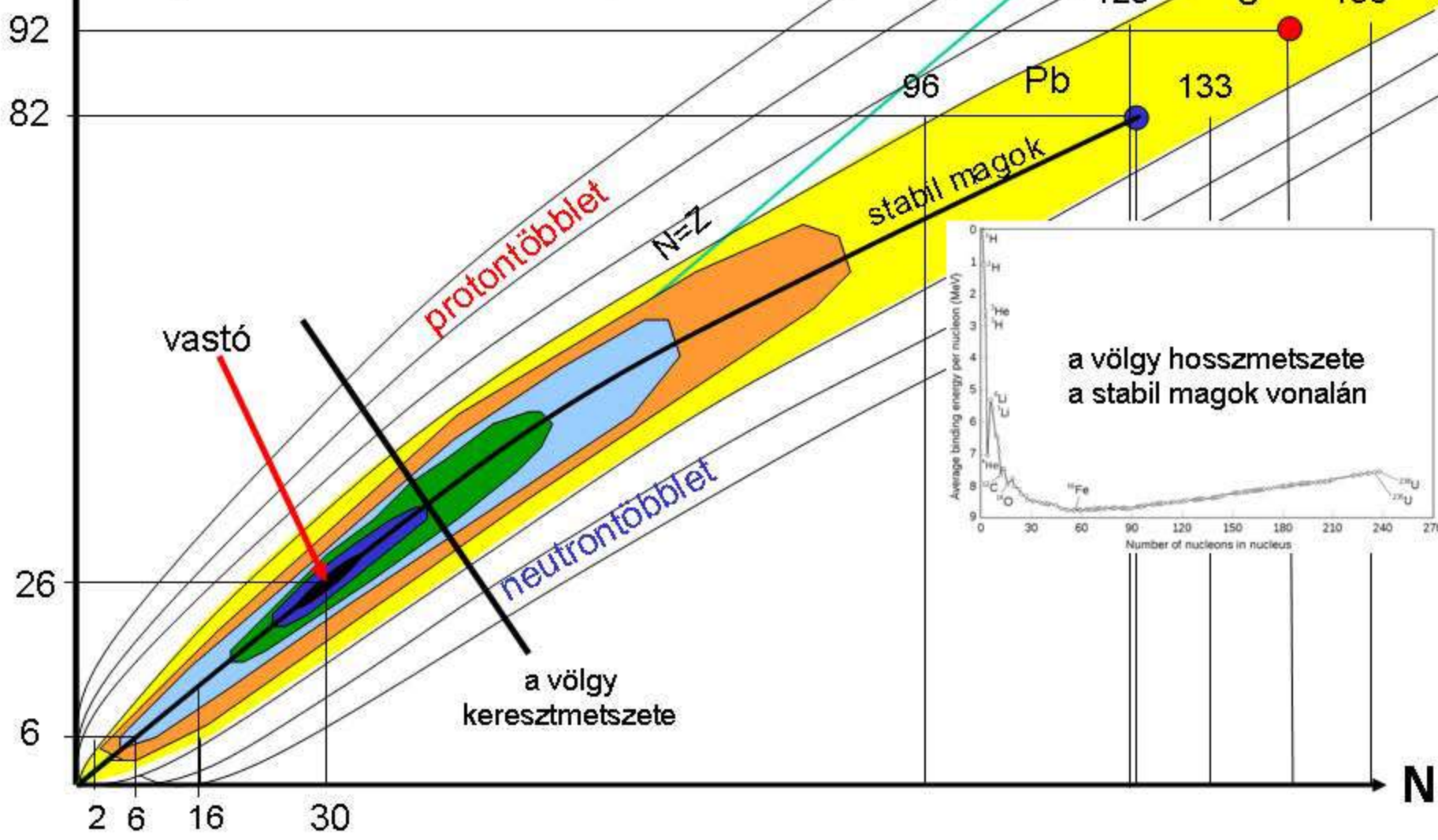
# A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe



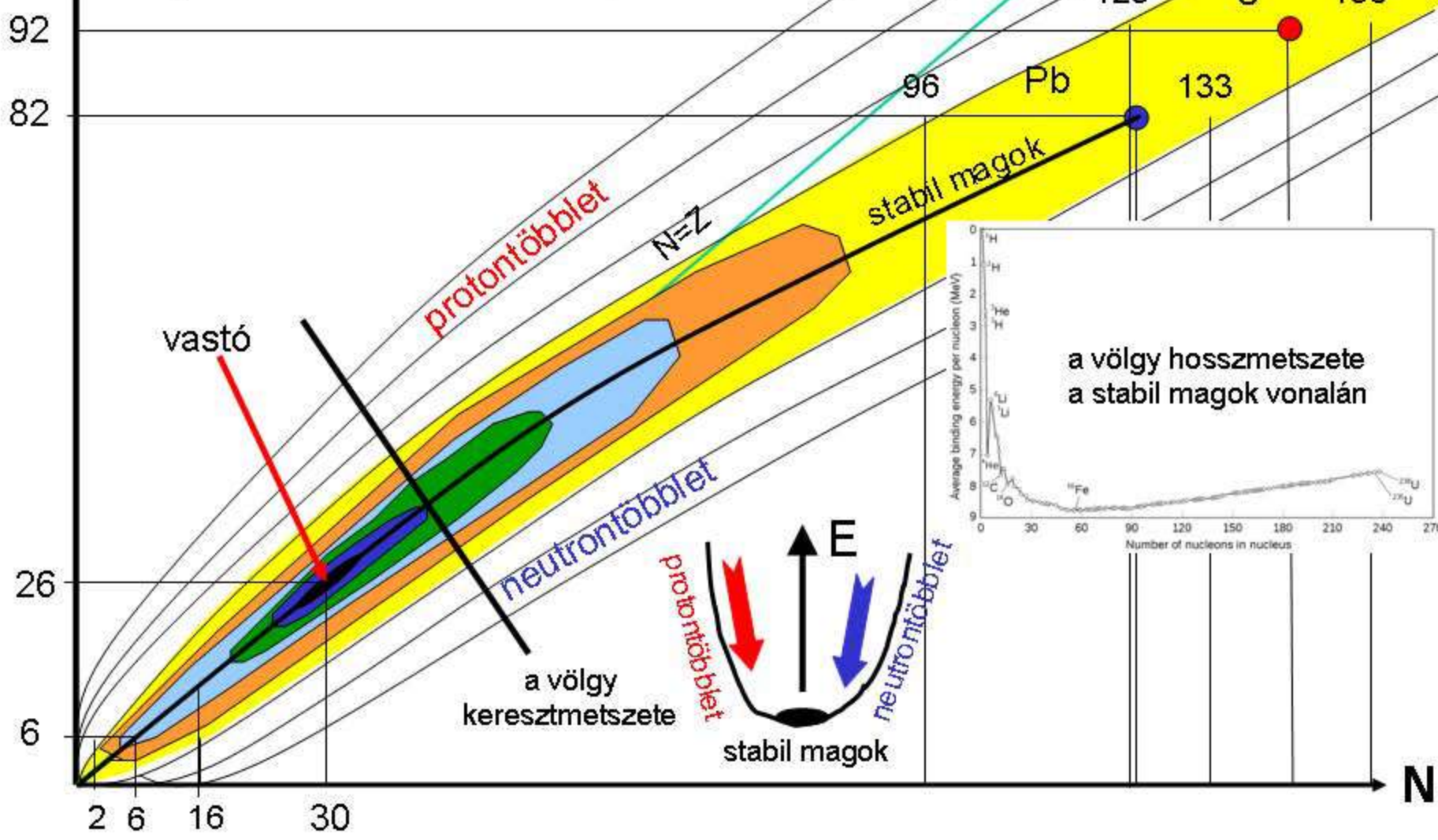
# Z A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe



# Z A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe



# Z A nukleáris völgy „szintvonalas” térképe



# A nukleáris völgy „3D” térképe



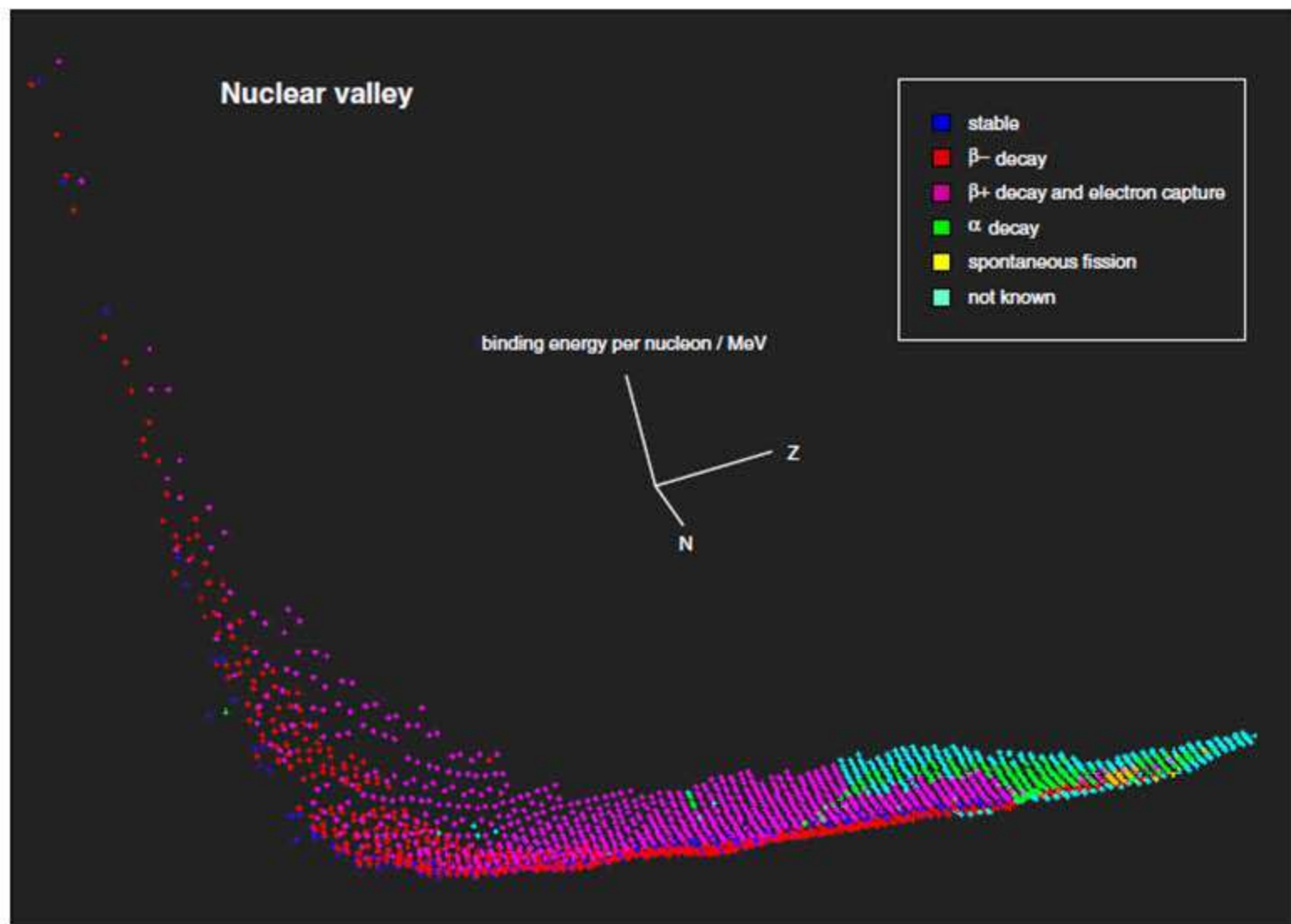
# A nukleáris völgy „3D” térképe

(szemüveg a ruhatárban)



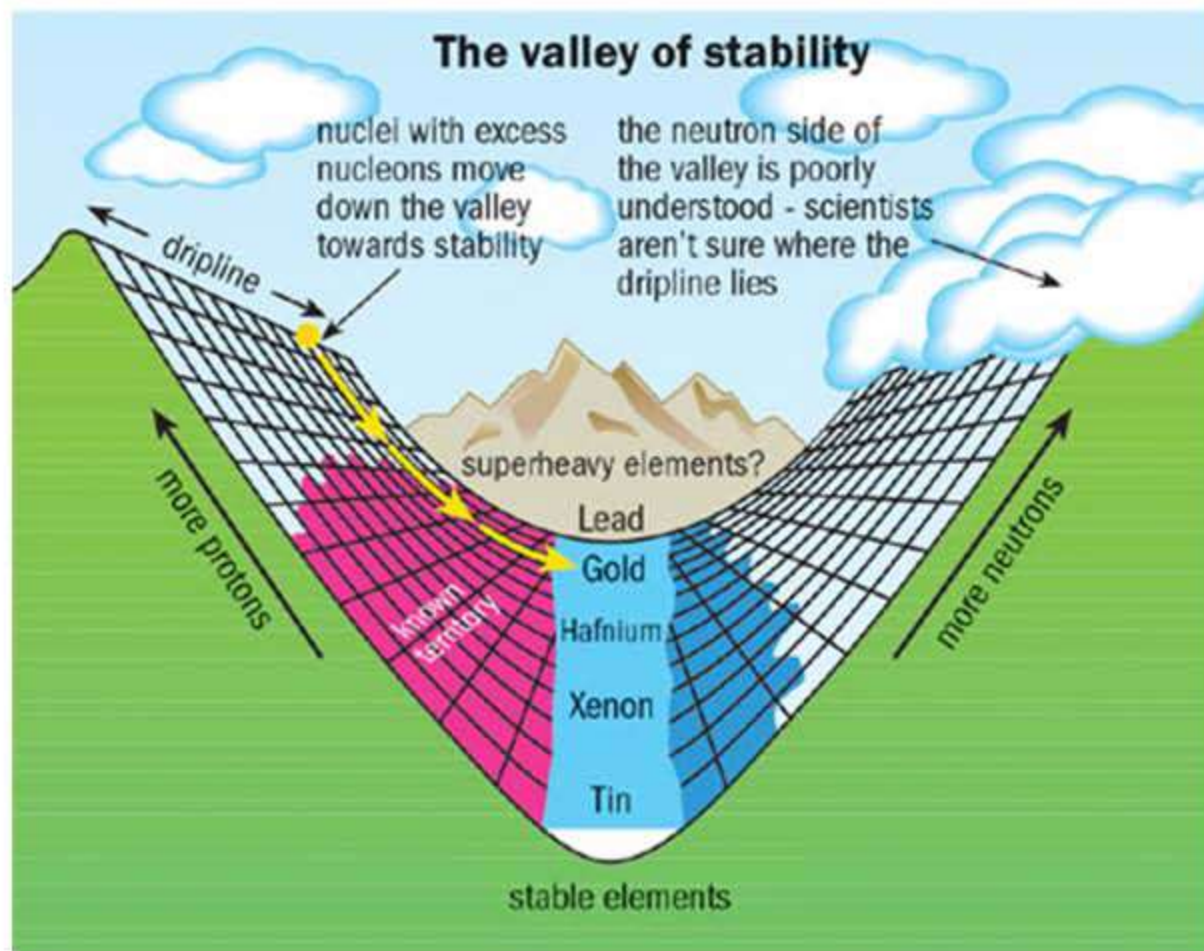
# A nukleáris völgy „3D” térképe

(szemüveg a ruhatárban)





# A nukleáris völgy hosszanti képe



# Atommag-átalakulások



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben



**spontán folyamatok**

# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben



**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben



**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel  
(pl. mozgási energia rovására)





# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel

(pl. mozgási energia rovasára)

magasabb energiájú  
állapotok felé



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel

(pl. mozgási energia rovására)

magasabb energiájú  
állapotok felé

**felfelé a völgy oldalán**



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel

(pl. mozgási energia rovására)

magasabb energiájú  
állapotok felé

**felfelé a völgy oldalán**

Merre?



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel

(pl. mozgási energia rovására)

magasabb energiájú  
állapotok felé

**felfelé a völgy oldalán**

Merre?

a legnagyobb meredekség vonala  
mentén – mint a víz a hegyoldalban\*



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel

(pl. mozgási energia rovására)

magasabb energiájú  
állapotok felé

**felfelé a völgy oldalán**

Merre?

a legnagyobb meredekség vonala  
mentén – mint a víz a hegyoldalban\*

\* ha ezt a fizika megengedi



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel

(pl. mozgási energia rovására)

magasabb energiájú  
állapotok felé

**felfelé a völgy oldalán**

Merre?

a legnagyobb meredekség vonala  
mentén – mint a víz a hegyoldalban\*

\* ha ezt a fizika megengedi

Milyen gyorsan?



# Atommag-átalakulások mozgások a nukleáris völgyben

**spontán folyamatok**

az energetikailag  
kedvezőbb  
állapotok felé

**LE A VÖLGYBE !**

külső energiabefektetéssel

(pl. mozgási energia rovására)

magasabb energiájú  
állapotok felé

**felfelé a völgy oldalán**

Merre?

a legnagyobb meredekség vonala  
mentén – mint a víz a hegyoldalon\*

\* ha ezt a fizika megengedi

Milyen gyorsan?

minél meredekebb a lejtő,  
annál gyorsabban

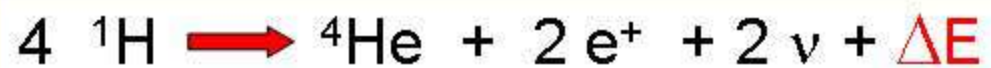


# Magfúzió a Napban

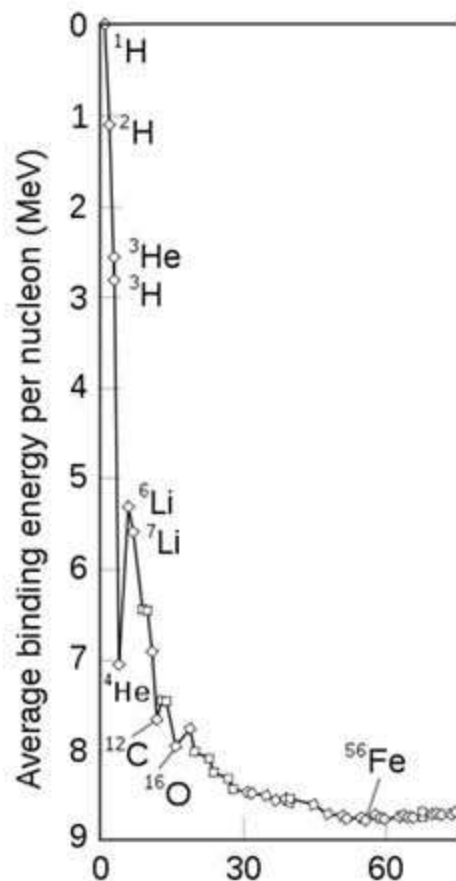
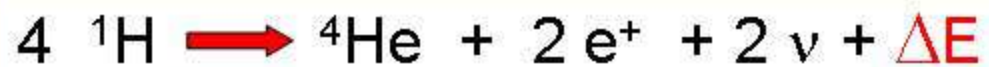




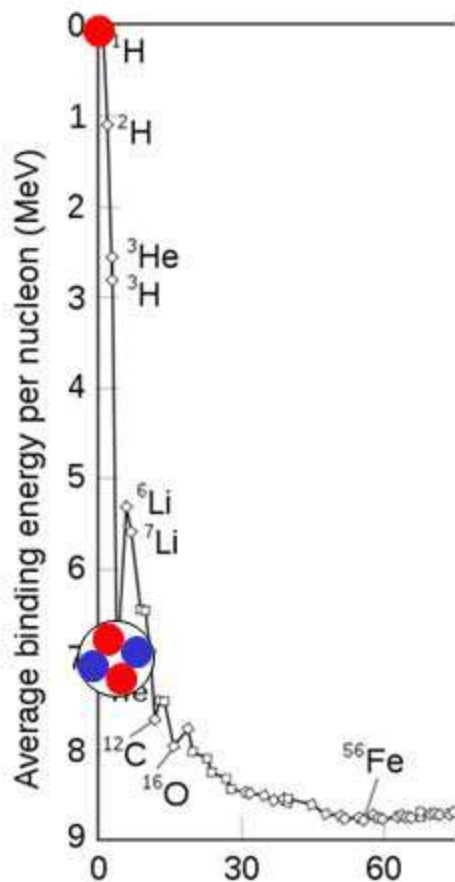
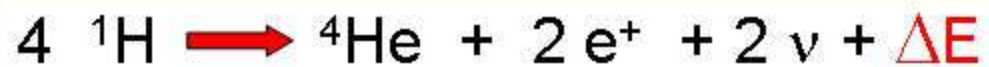
## Magfúzió a Napban



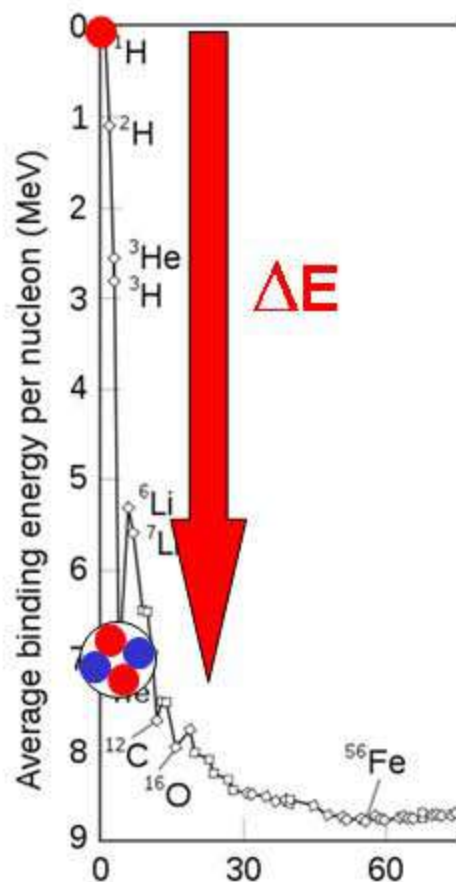
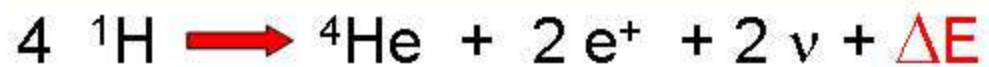
# Magfúzió a Napban



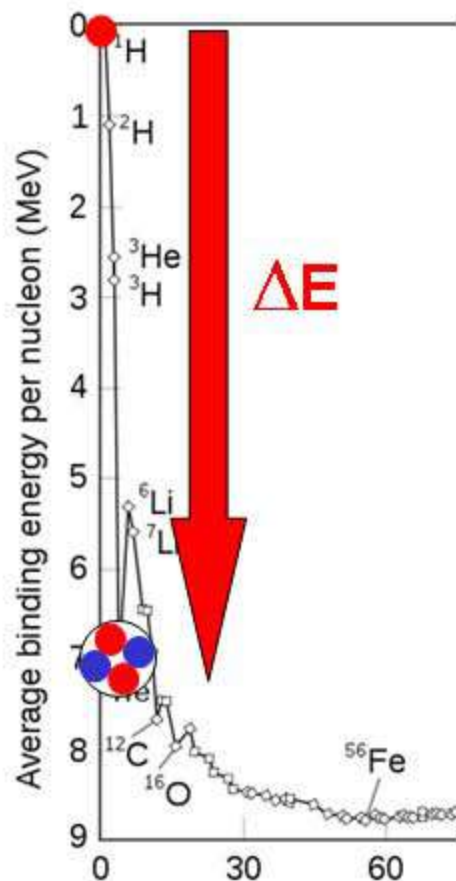
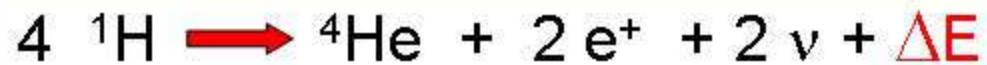
# Magfúzió a Napban



# Magfúzió a Napban



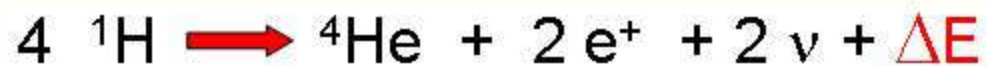
# Magfúzió a Napban



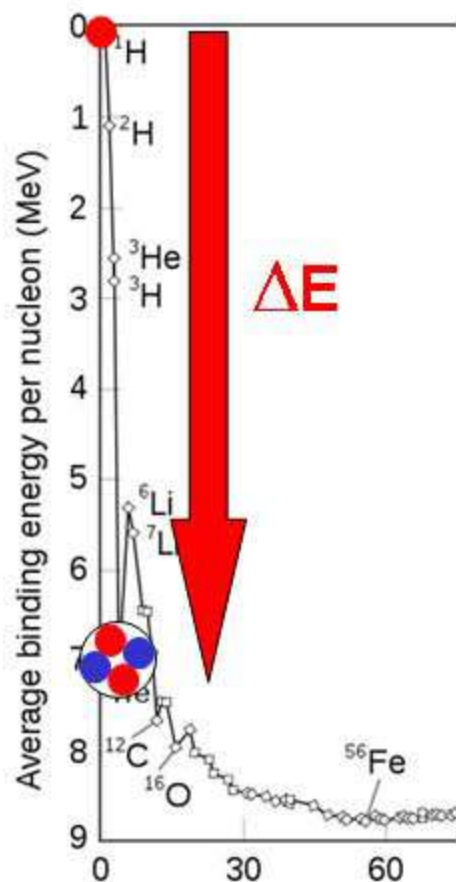
első lépés:  
két proton  
ütközése:



# Magfúzió a Napban



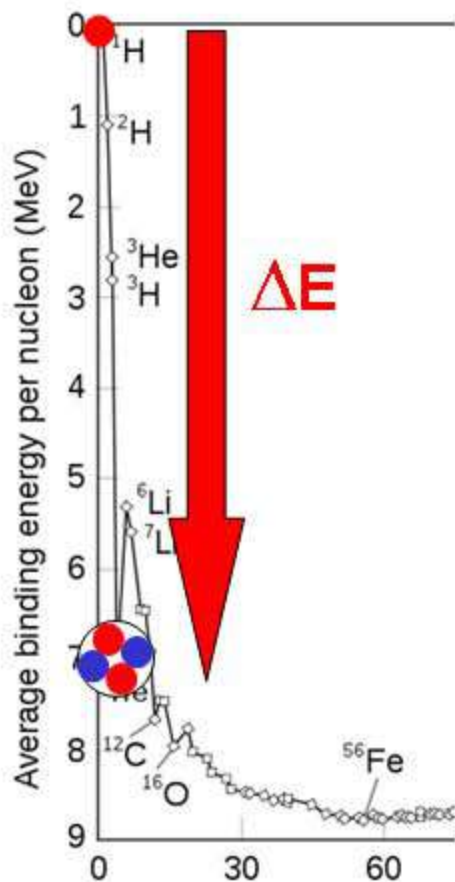
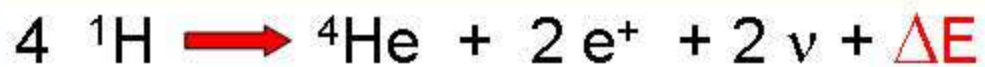
lassú  
protonok  
ütközése



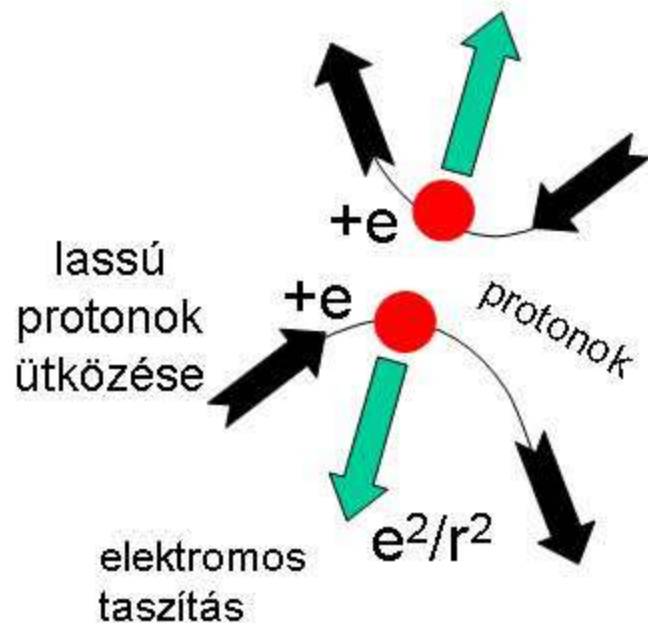
első lépés:  
két proton  
ütközése:



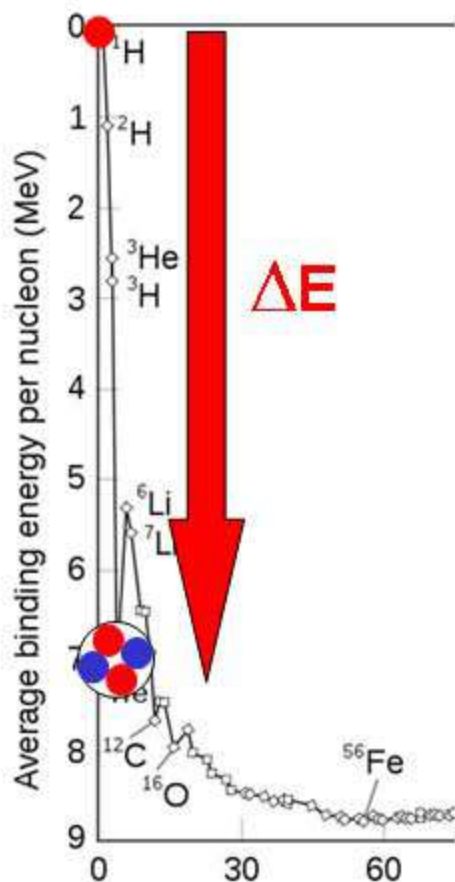
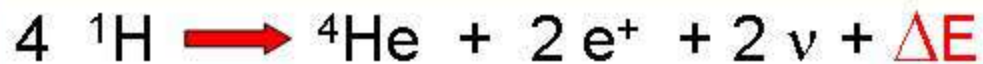
# Magfúzió a Napban



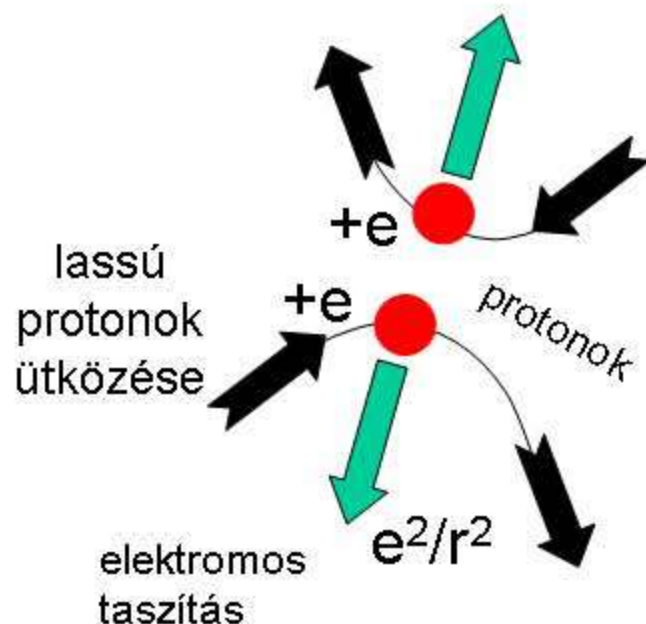
első lépés:  
két proton  
ütközése:



# Magfúzió a Napban



első lépés:  
két proton  
ütközése:

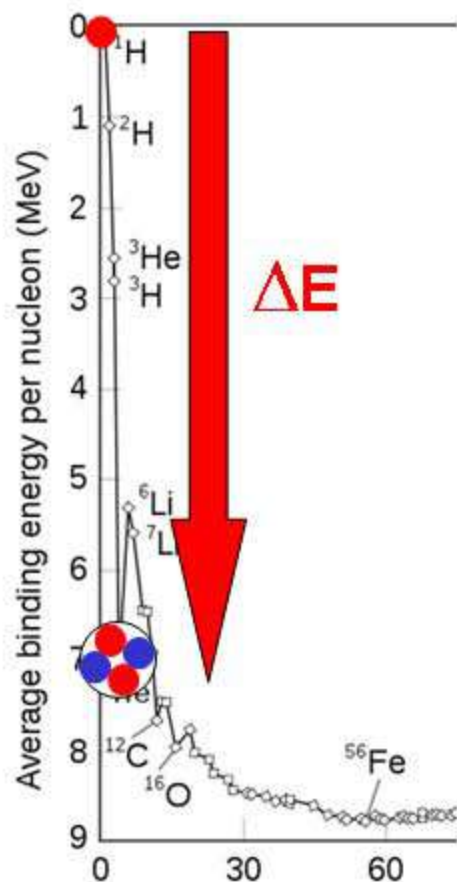
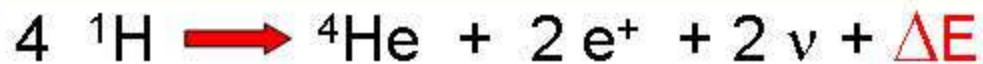


gyors  
protonok  
ütközése

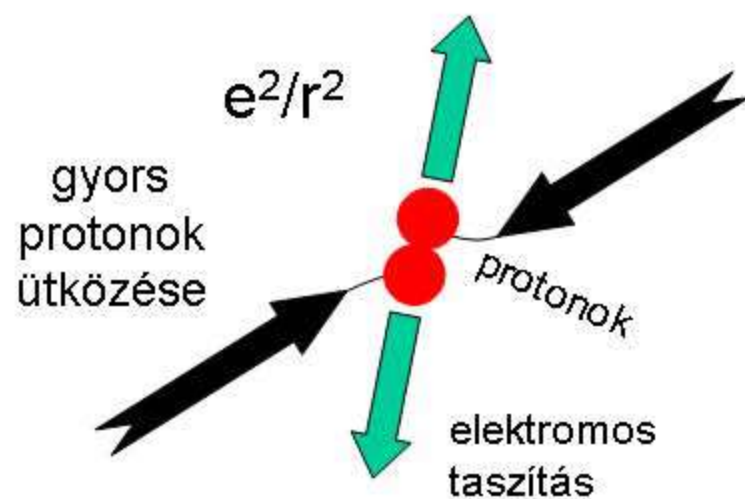
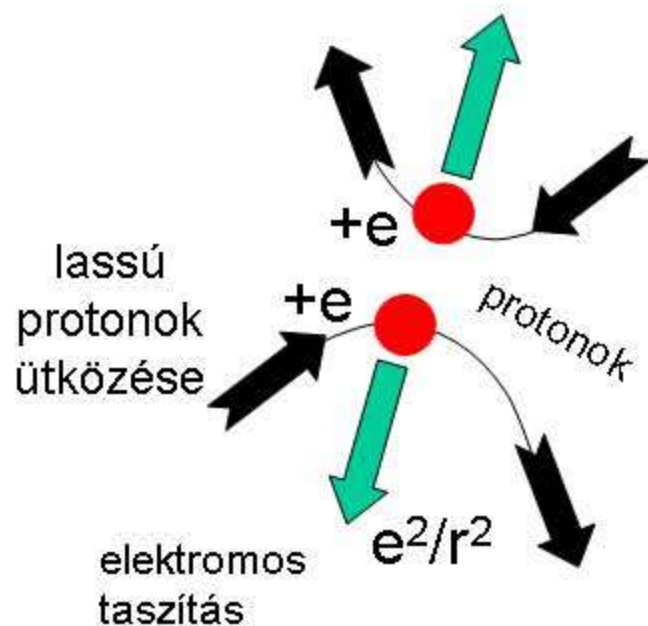




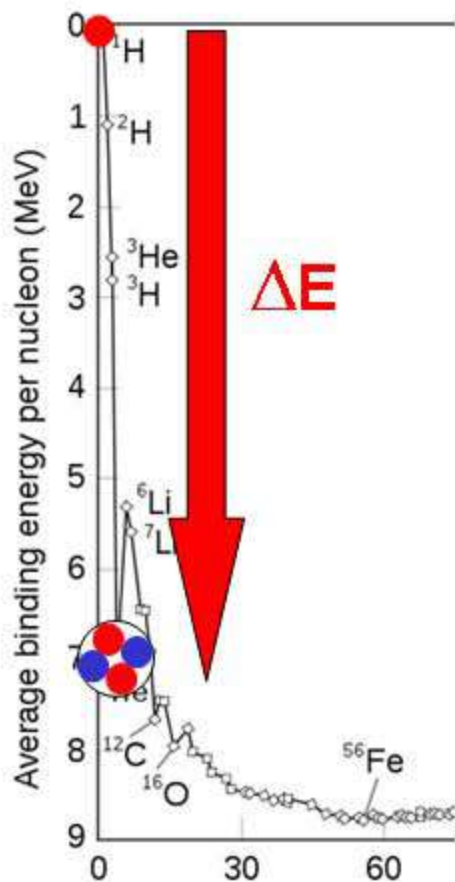
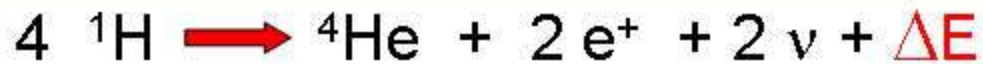
# Magfúzió a Napban



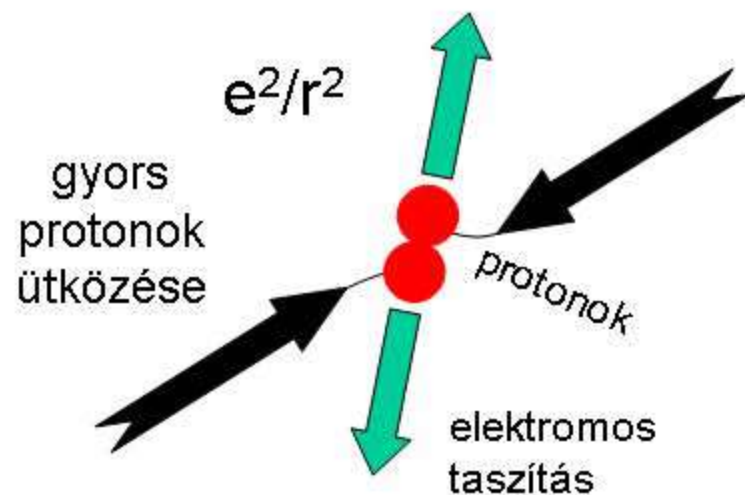
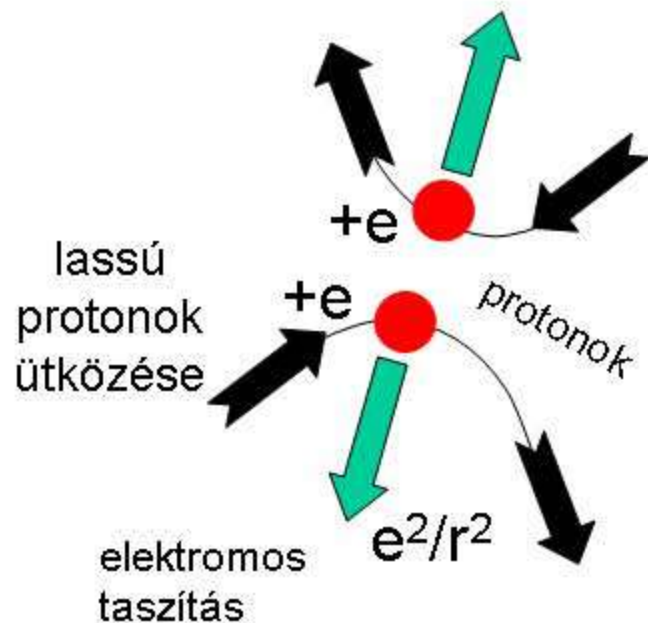
első lépés:  
két proton  
ütközése:



# Magfúzió a Napban



első lépés:  
két proton  
ütközése:



a Nap középpontjában 14 millió fok van!



azaz mégsem ilyen egyszerű!



**azaz mégsem ilyen egyszerű!**

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!



**azaz mégsem ilyen egyszerű!**

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag **NEM LÉTEZIK!**

segít a **gyenge kölcsönhatás:**



azaz mégsem ilyen egyszerű!

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

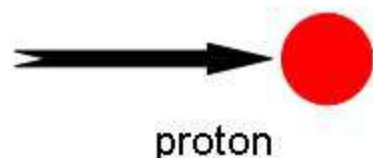
segít a **gyenge kölcsönhatás**:



azaz mégsem ilyen egyszerű!

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

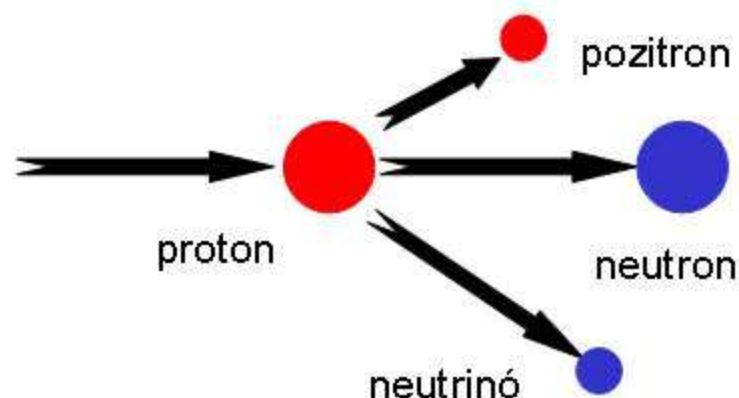
segít a **gyenge kölcsönhatás**:



## azaz mégsem ilyen egyszerű!

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

segít a **gyenge kölcsönhatás**:

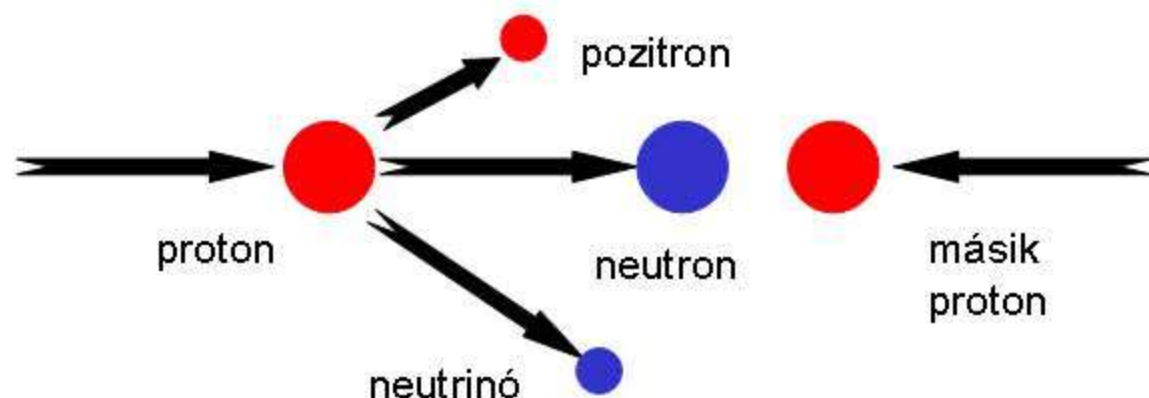




## azaz mégsem ilyen egyszerű!

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

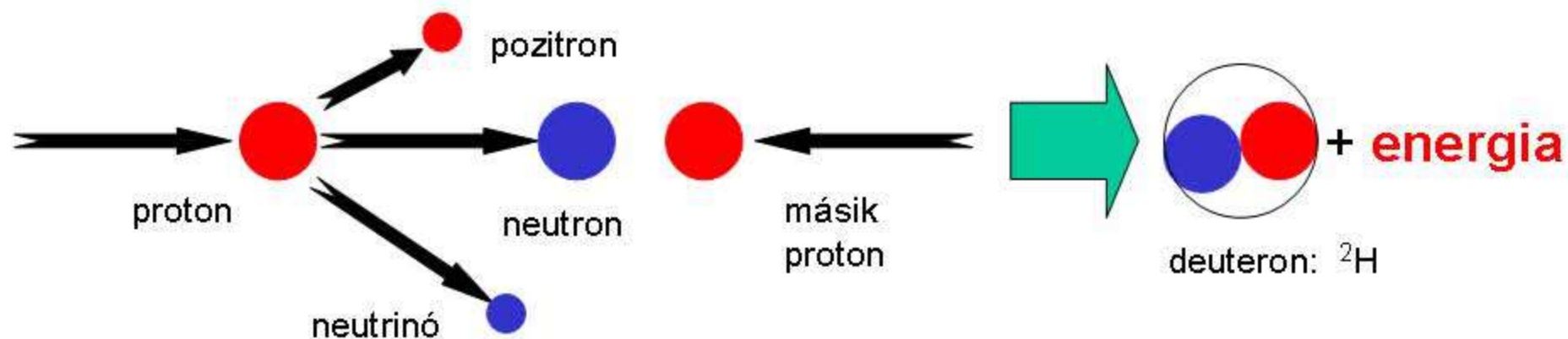
segít a **gyenge kölcsönhatás**:



## azaz mégsem ilyen egyszerű!

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

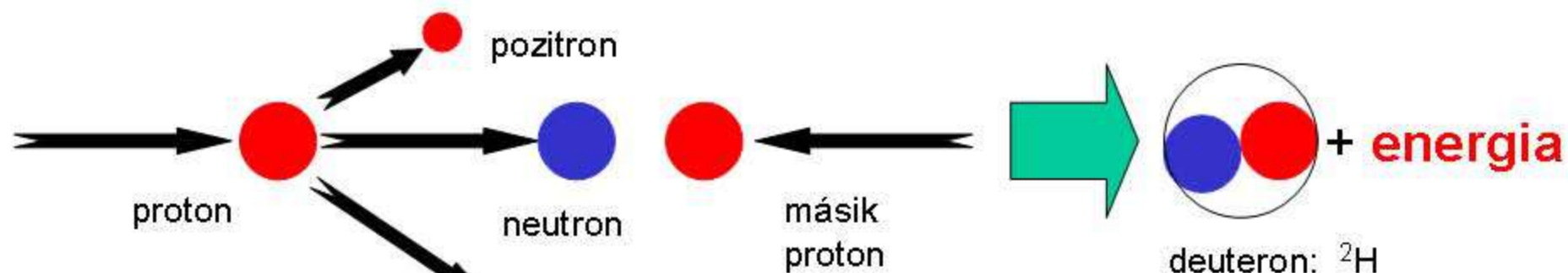
segít a **gyenge kölcsönhatás**:



## azaz mégsem ilyen egyszerű!

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

segít a **gyenge kölcsönhatás**:

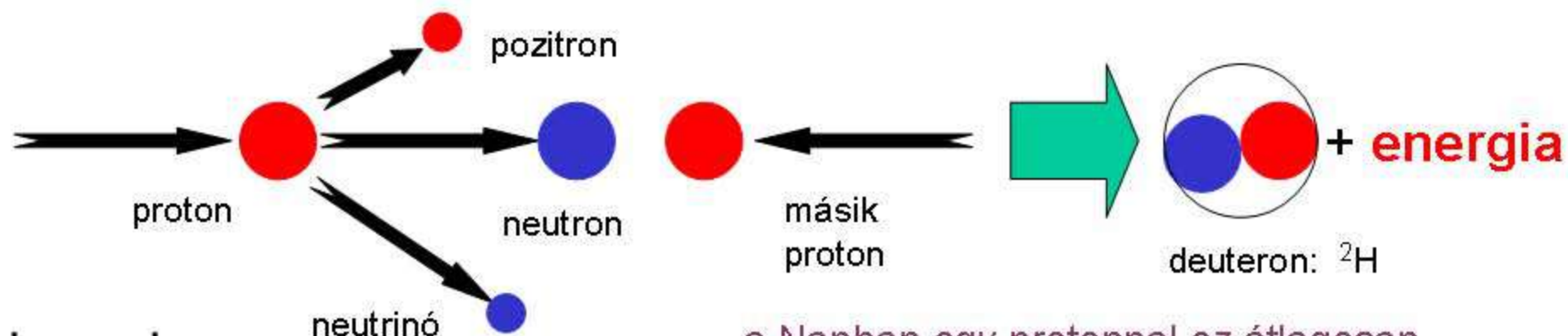


a Napban egy protonnal ez átlagosan  
1 millió évente történik meg

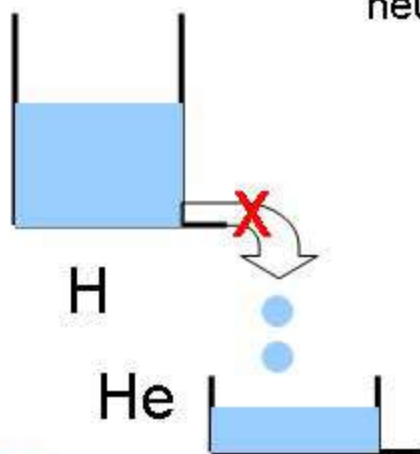
## azaz mégsem ilyen egyszerű!

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

segít a **gyenge kölcsönhatás**:



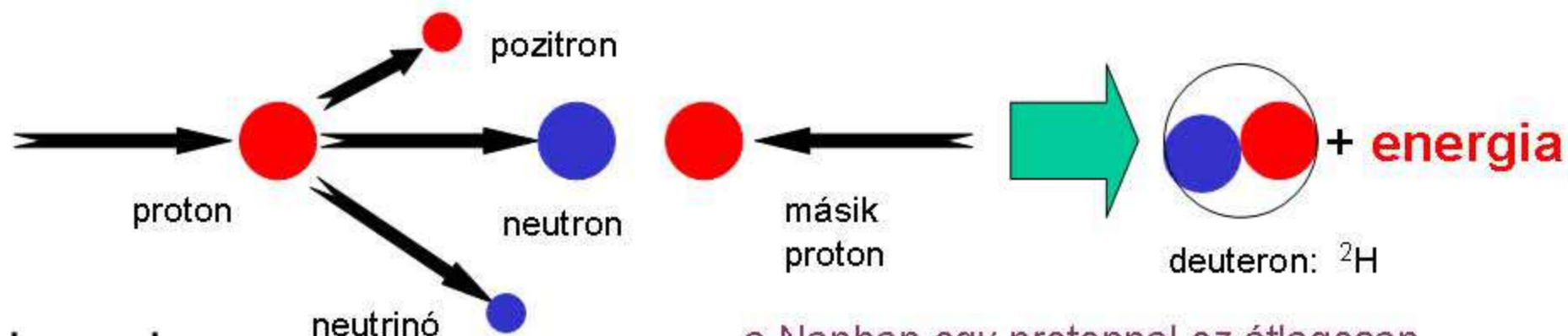
a Napban egy protonnal ez átlagosan  
1 millió évente történik meg



## azaz mégsem ilyen egyszerű!

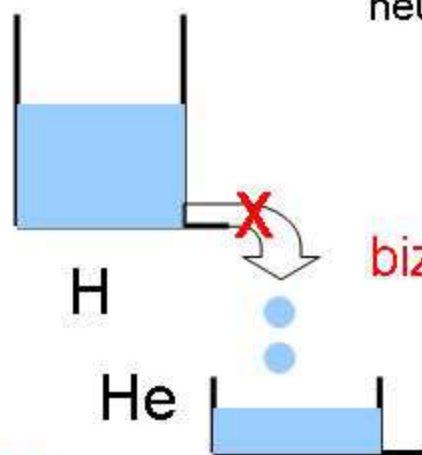
két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

segít a **gyenge kölcsönhatás**:



a Napban egy protonnal ez átlagosan  
1 millió évente történik meg

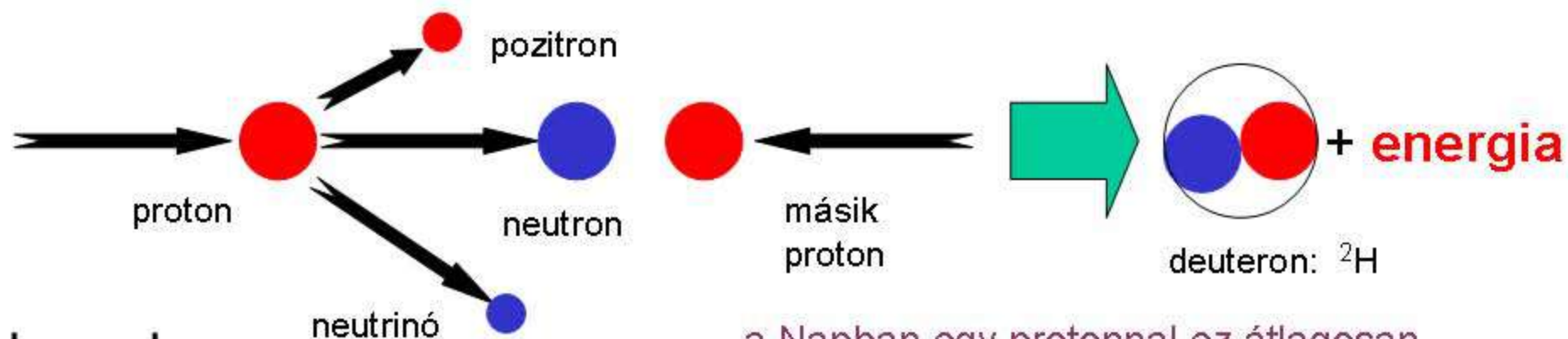
ez a magfúzió  
biztonsági szelepe!



## azaz mégsem ilyen egyszerű!

két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

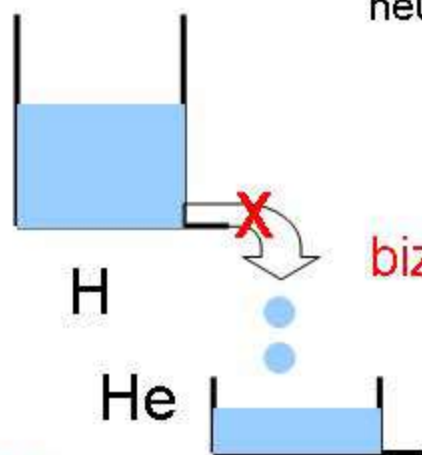
segít a **gyenge kölcsönhatás**:



a Napban egy protonnal ez átlagosan  
1 millió évente történik meg

a további folyamatokat már az erős  
kölcsönhatás kormányozza: kb.  $10^{-10}$  s

ez a magfúzió  
biztonsági szelepe!



# Radioaktív bomlás



# Radioaktív bomlás

kis lépésekkel a stabilitás felé





## Radioaktív bomlás

kis lépésekkel a stabilitás felé

Túl sok nukleon a magban:



## Radioaktív bomlás

kis lépésekkel a stabilitás felé

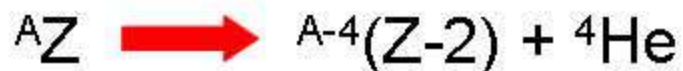
Túl sok nukleon a magban: **alfa-bomlás**



## Radioaktív bomlás

kis lépésekkel a stabilitás felé

Túl sok nukleon a magban: **alfa-bomlás**

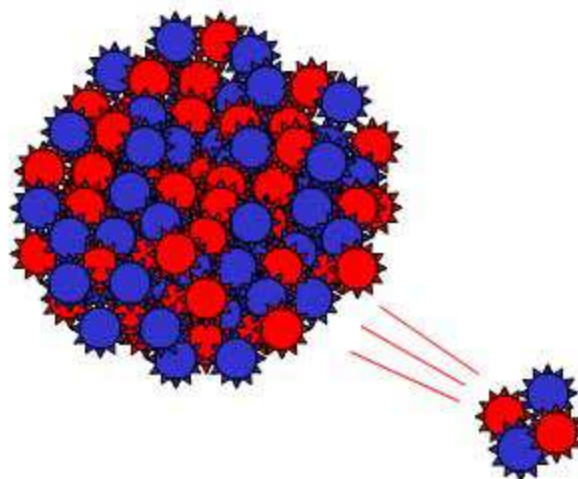
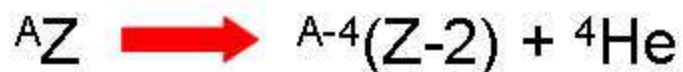


# Radioaktív bomlás

kis lépésekkel a stabilitás felé

Túl sok nukleon a magban:

alfa-bomlás

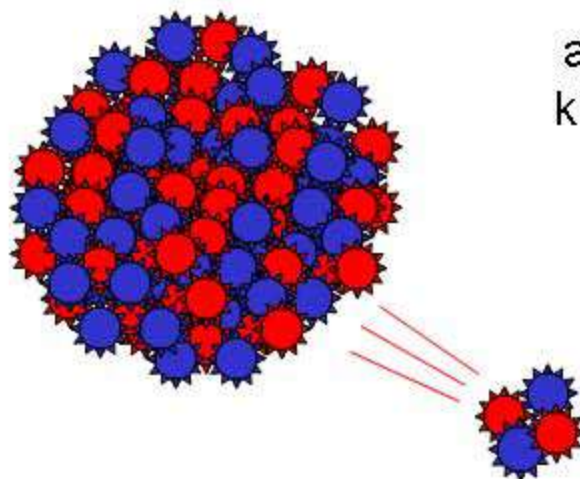
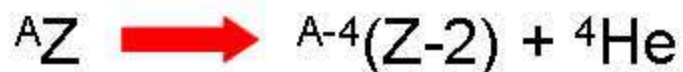


# Radioaktív bomlás

kis lépésekkel a stabilitás felé

Túl sok nukleon a magban:

**alfa-bomlás**



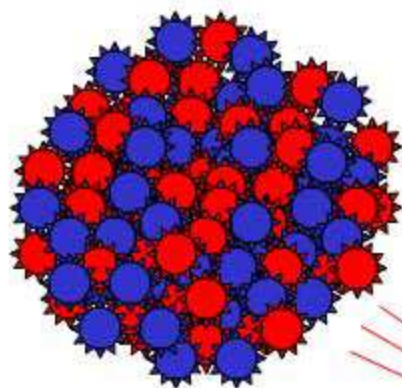
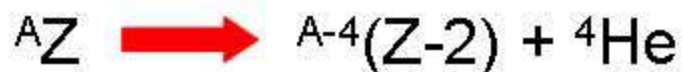
a túl nagy mag  
külső felesleges  
részeit

# Radioaktív bomlás

kis lépésekkel a stabilitás felé

Túl sok nukleon a magban:

**alfa-bomlás**



a túl nagy mag  
kilöki felesleges  
részeit

alfa-részecske  
=  ${}^4_2\text{He}$  mag

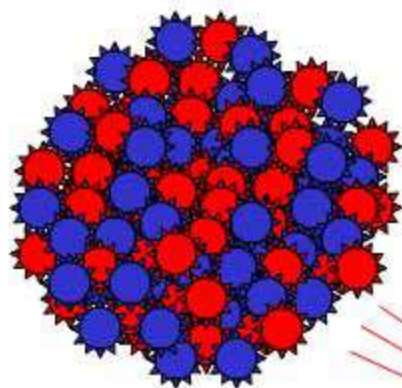
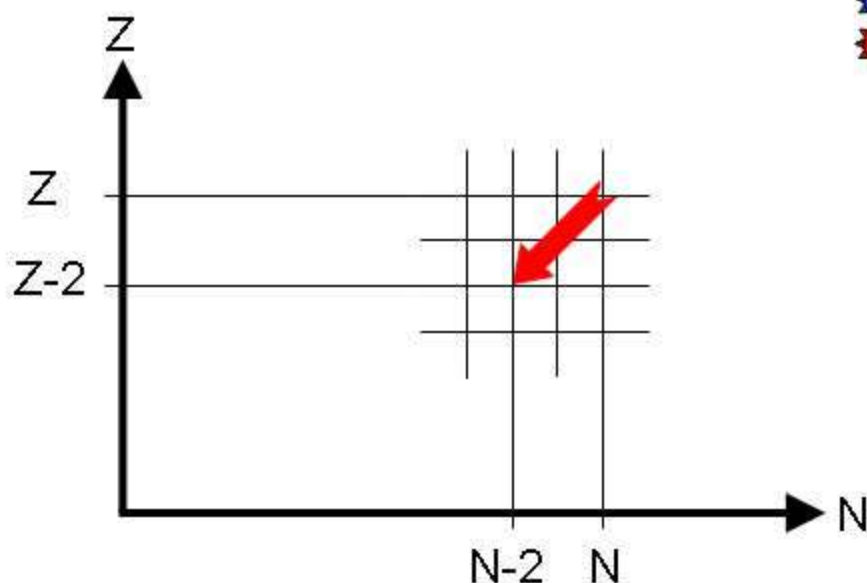
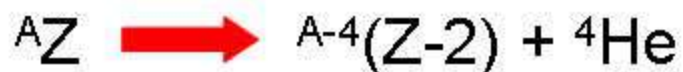


# Radioaktív bomlás

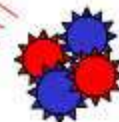
kis lépésekkel a stabilitás felé

Túl sok nukleon a magban:

**alfa-bomlás**



a túl nagy mag  
külső felesleges  
részeit



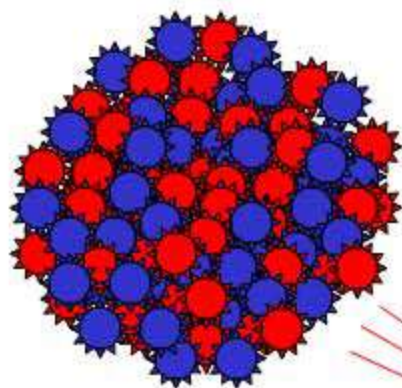
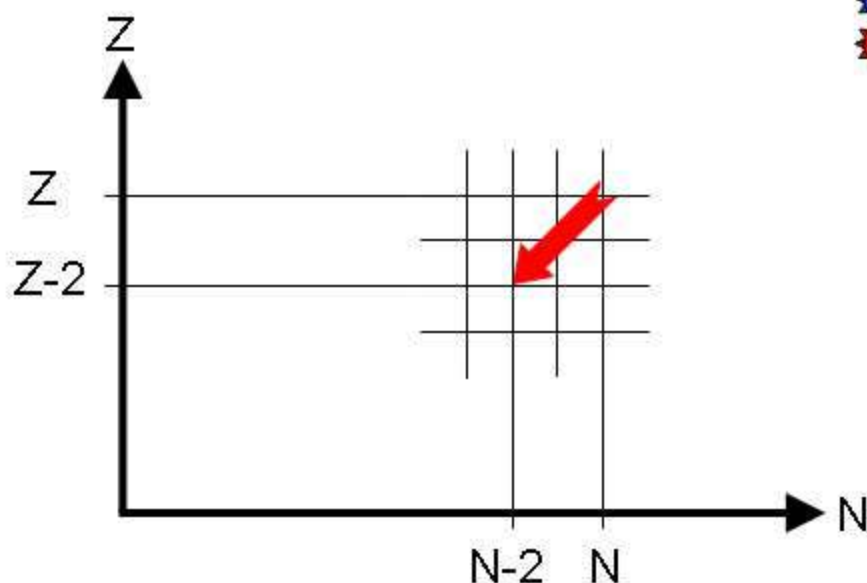
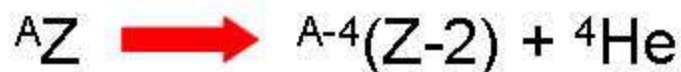
alfa-részecske  
=  ${}^4\text{He}$  mag

# Radioaktív bomlás

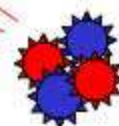
kis lépésekkel a stabilitás felé

Túl sok nukleon a magban:

**alfa-bomlás**



a túl nagy mag  
kilöki felesleges  
részeit



alfa-részecske  
=  ${}^4\text{He}$  mag

az alfa-részecske erősen  
kötött objektum!



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

---

**béta-bomlás**



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

**béta-bomlás**

---

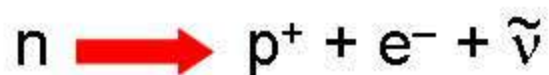
ha túl sok a neutron:



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

**béta-bomlás**

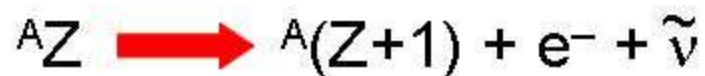
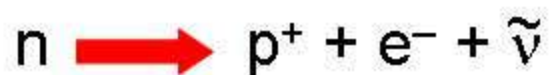
ha túl sok a neutron:



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

**béta-bomlás**

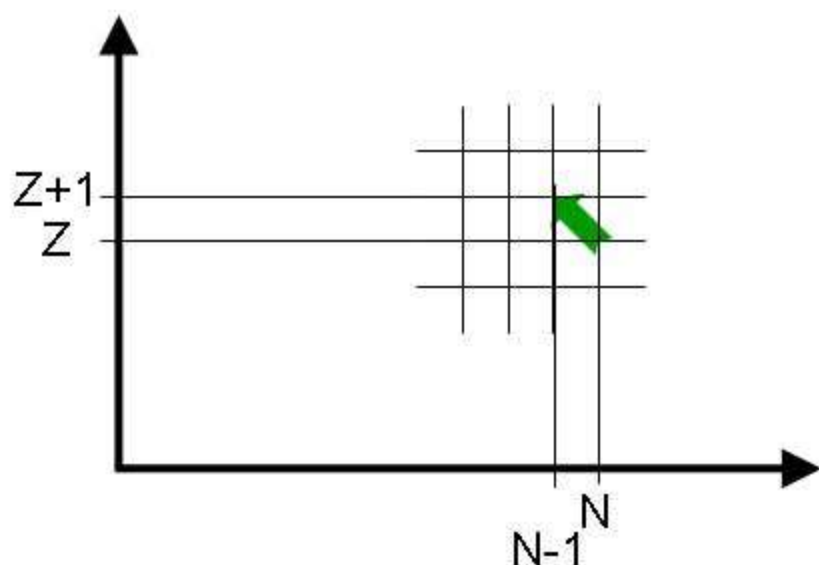
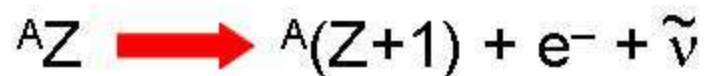
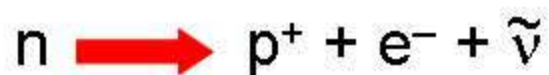
ha túl sok a neutron:



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

**béta-bomlás**

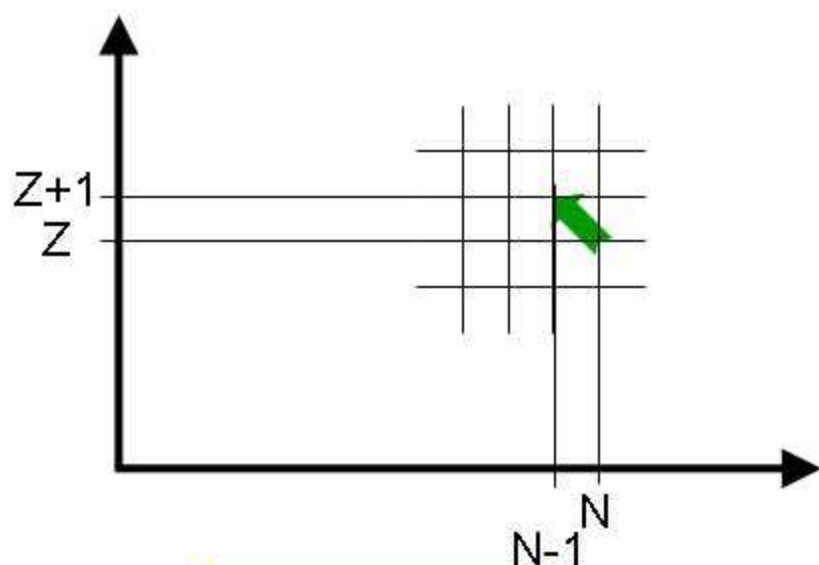
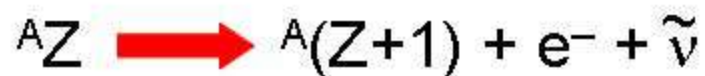
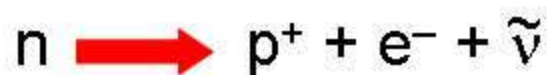
ha túl sok a neutron:



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

**béta-bomlás**

ha túl sok a neutron:



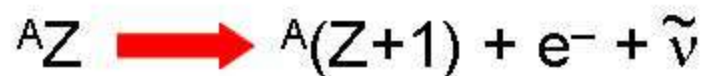
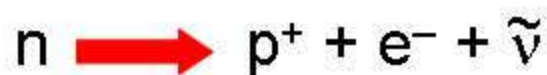
**$\beta^-$  - bomlás**



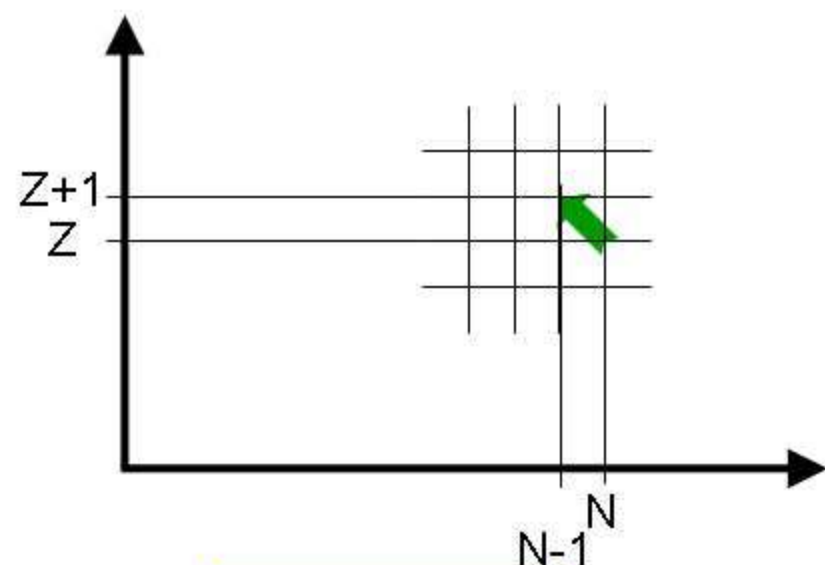
Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

**béta-bomlás**

ha túl sok a neutron:



ha túl sok a proton:



**$\beta^-$  - bomlás**

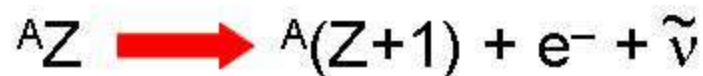
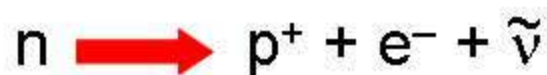




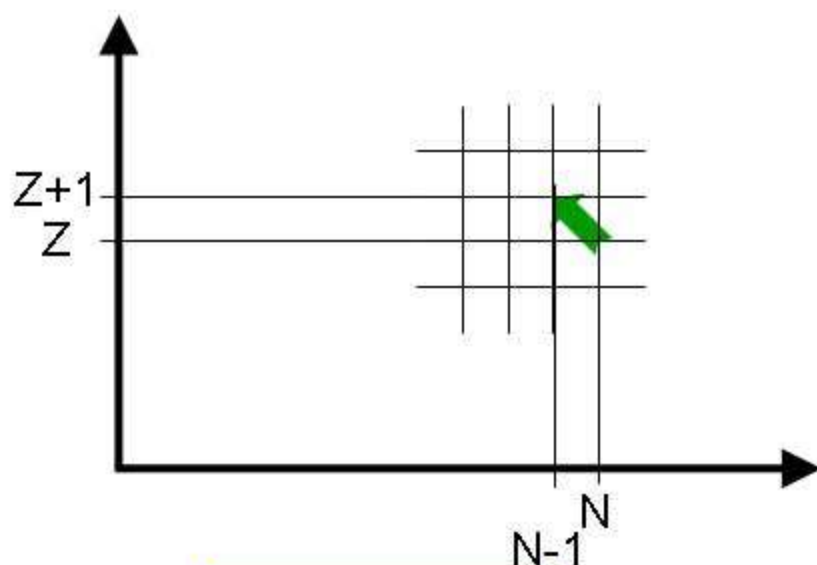
Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

**béta-bomlás**

ha túl sok a neutron:



ha túl sok a proton:



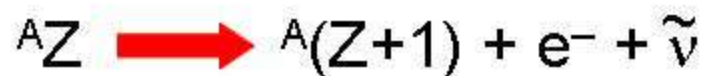
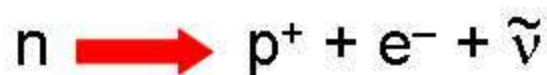
**$\beta^-$  - bomlás**



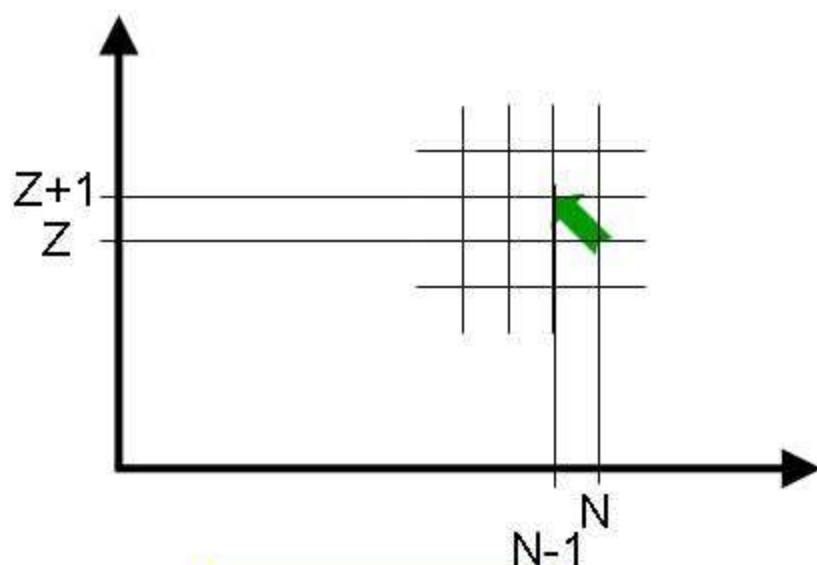
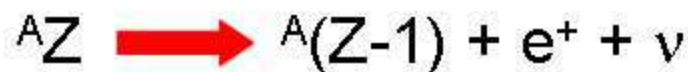
Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

**béta-bomlás**

ha túl sok a neutron:



ha túl sok a proton:



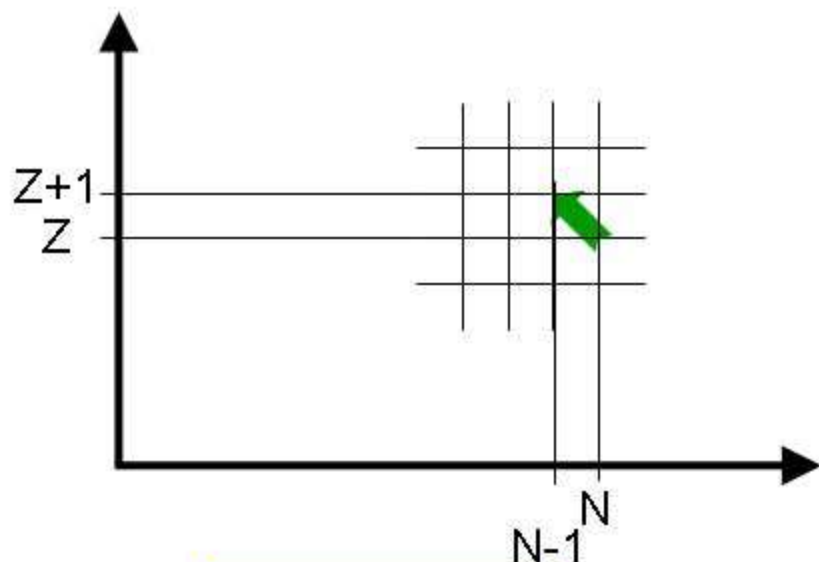
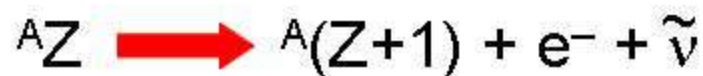
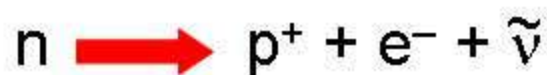
**$\beta^-$  - bomlás**



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

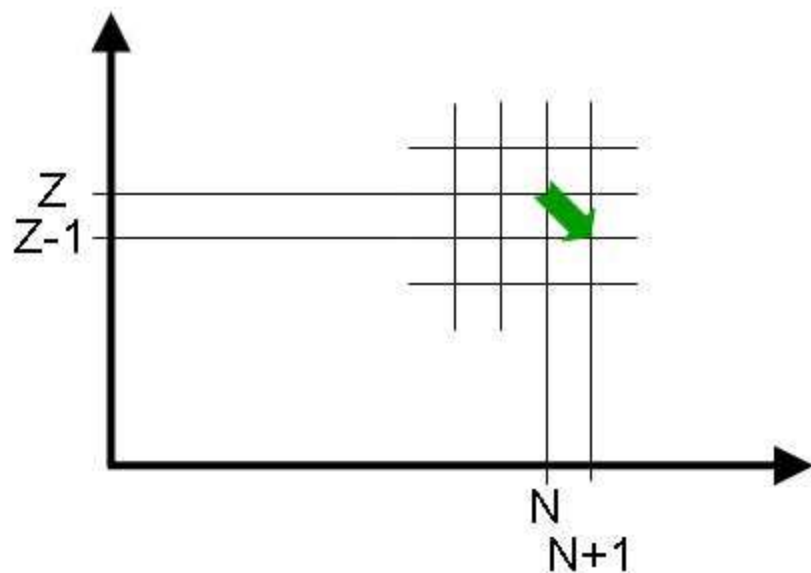
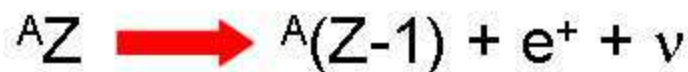
**béta-bomlás**

ha túl sok a neutron:



**$\beta^-$  - bomlás**

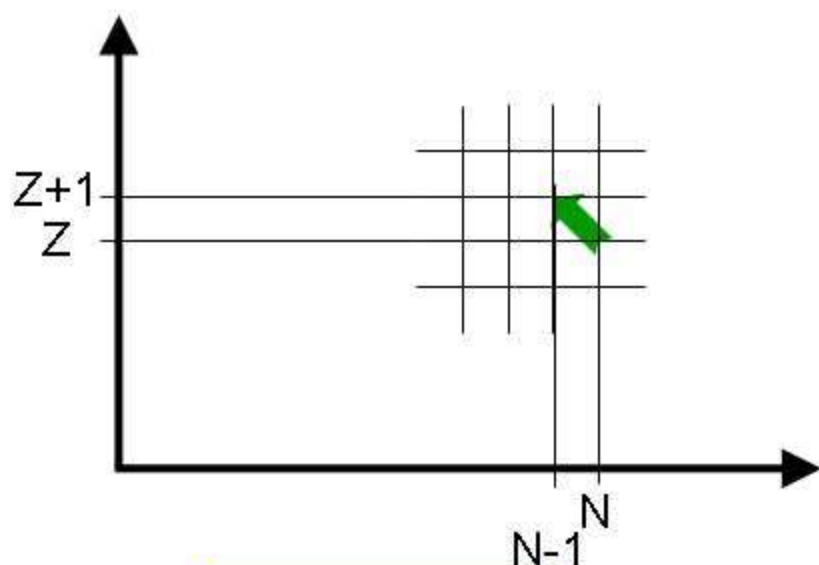
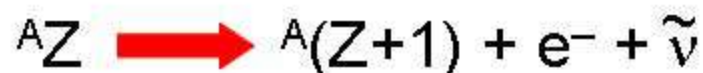
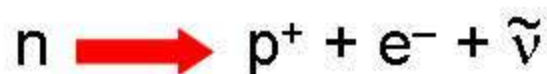
ha túl sok a proton:



Túl sok proton vagy neutron  
meredeken a szakadékba:

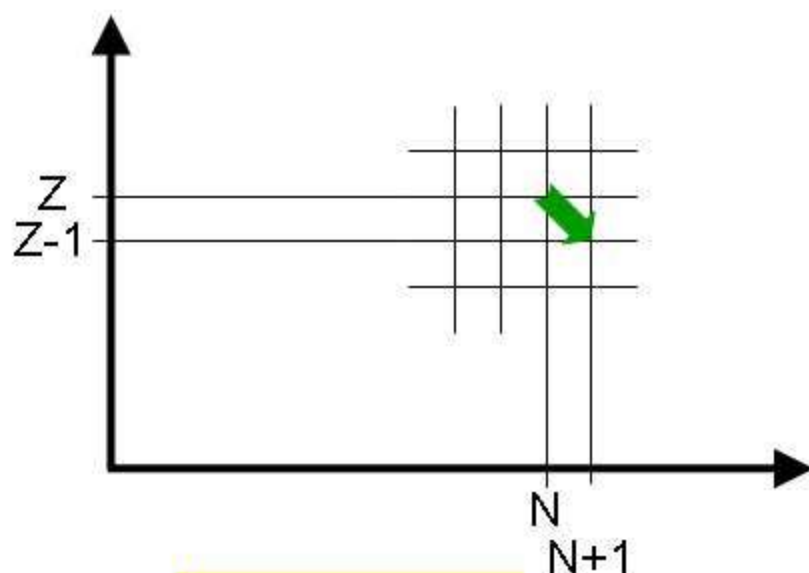
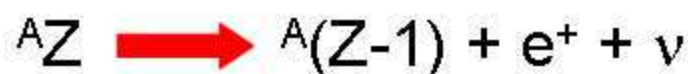
**béta-bomlás**

ha túl sok a neutron:



**$\beta^-$  - bomlás**

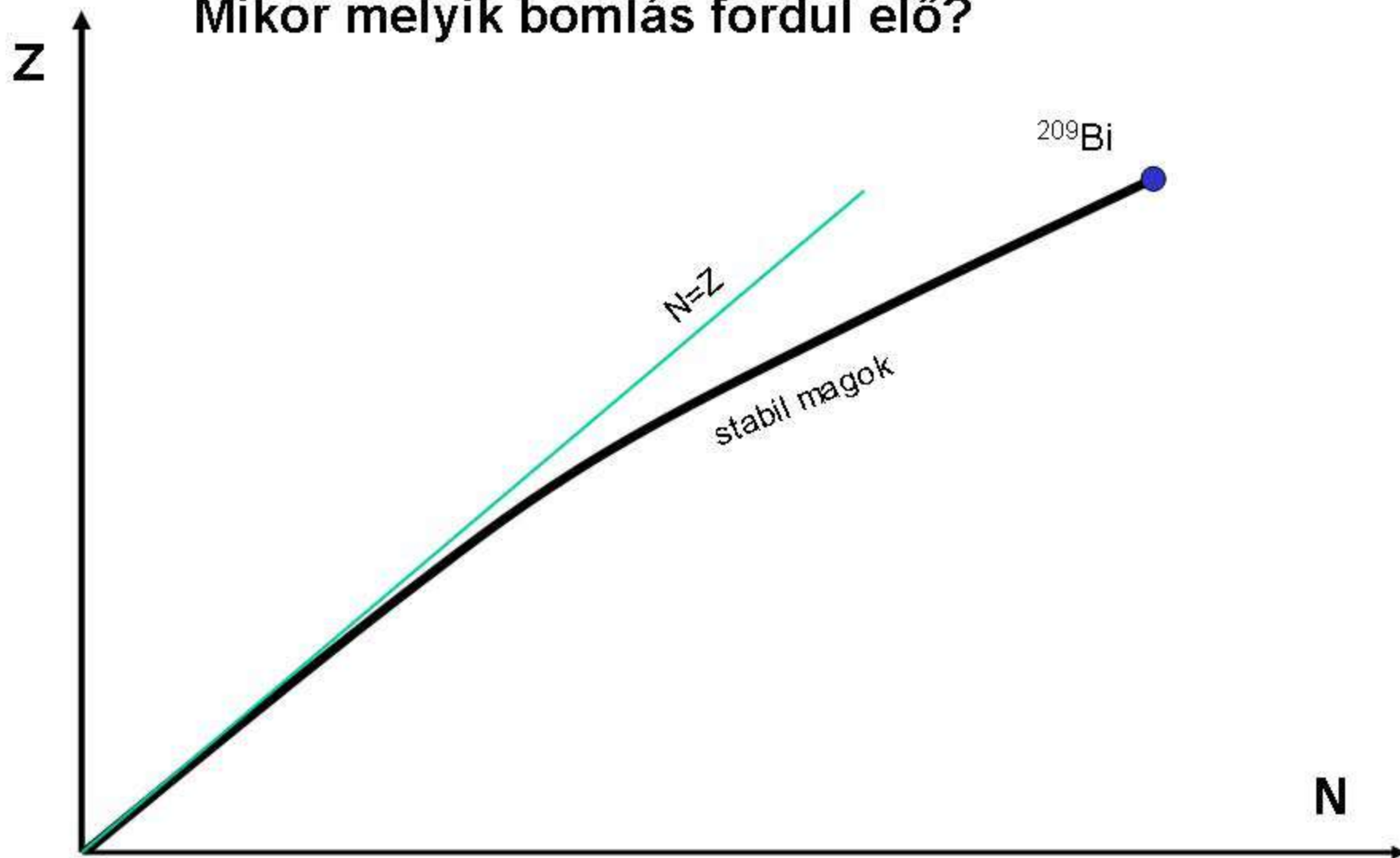
ha túl sok a proton:



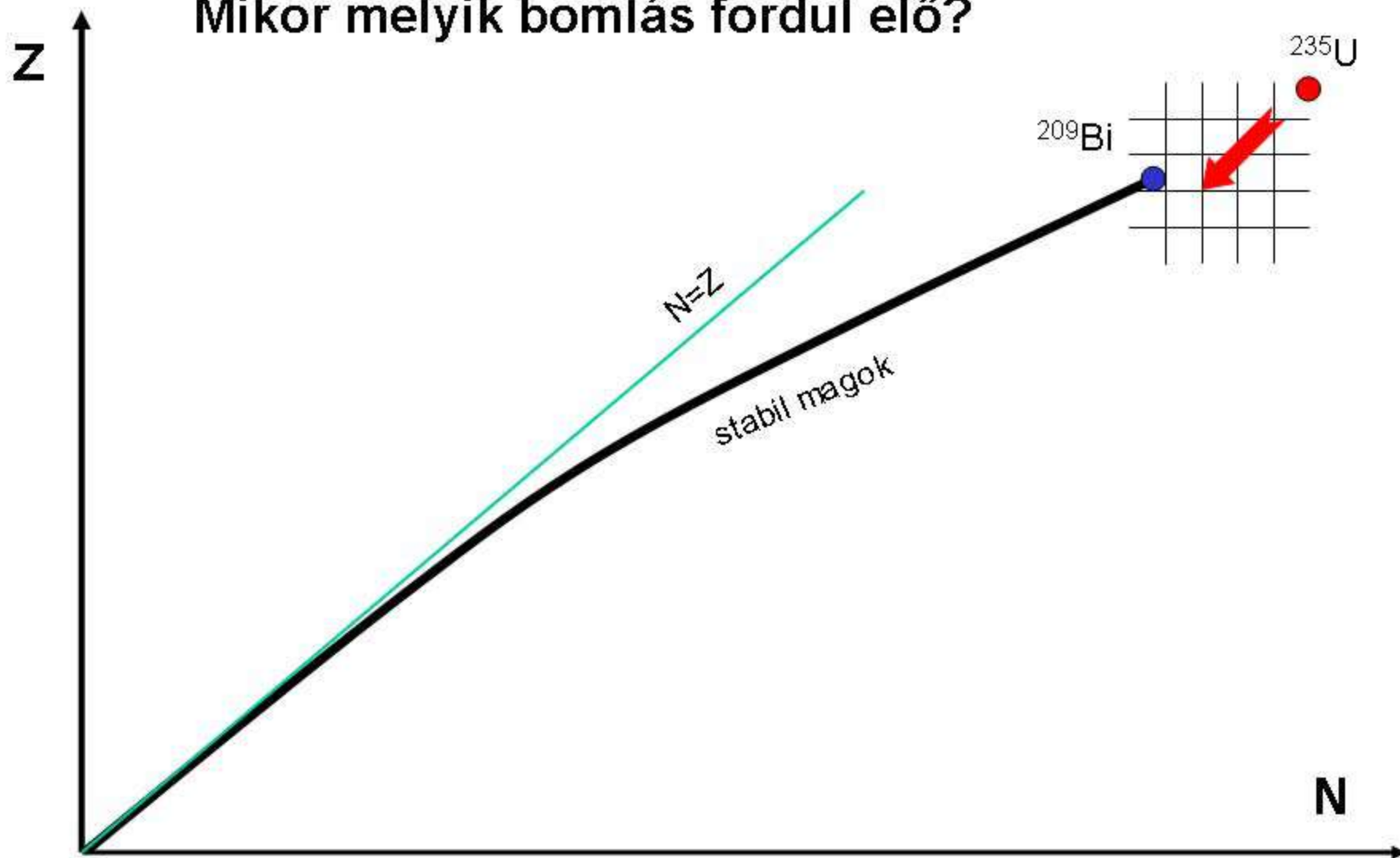
**$\beta^+$  - bomlás**



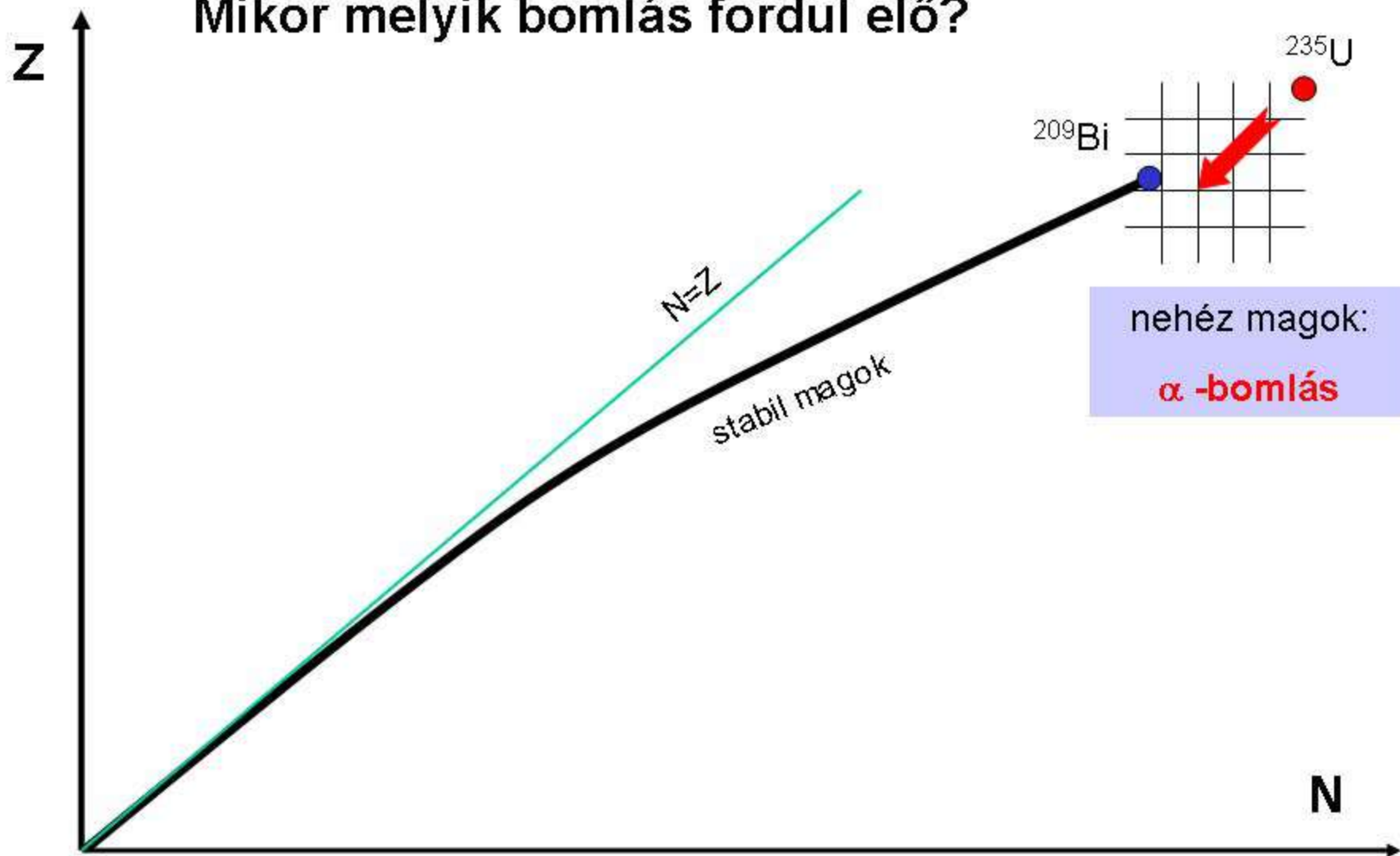
# Mikor melyik bomlás fordul elő?



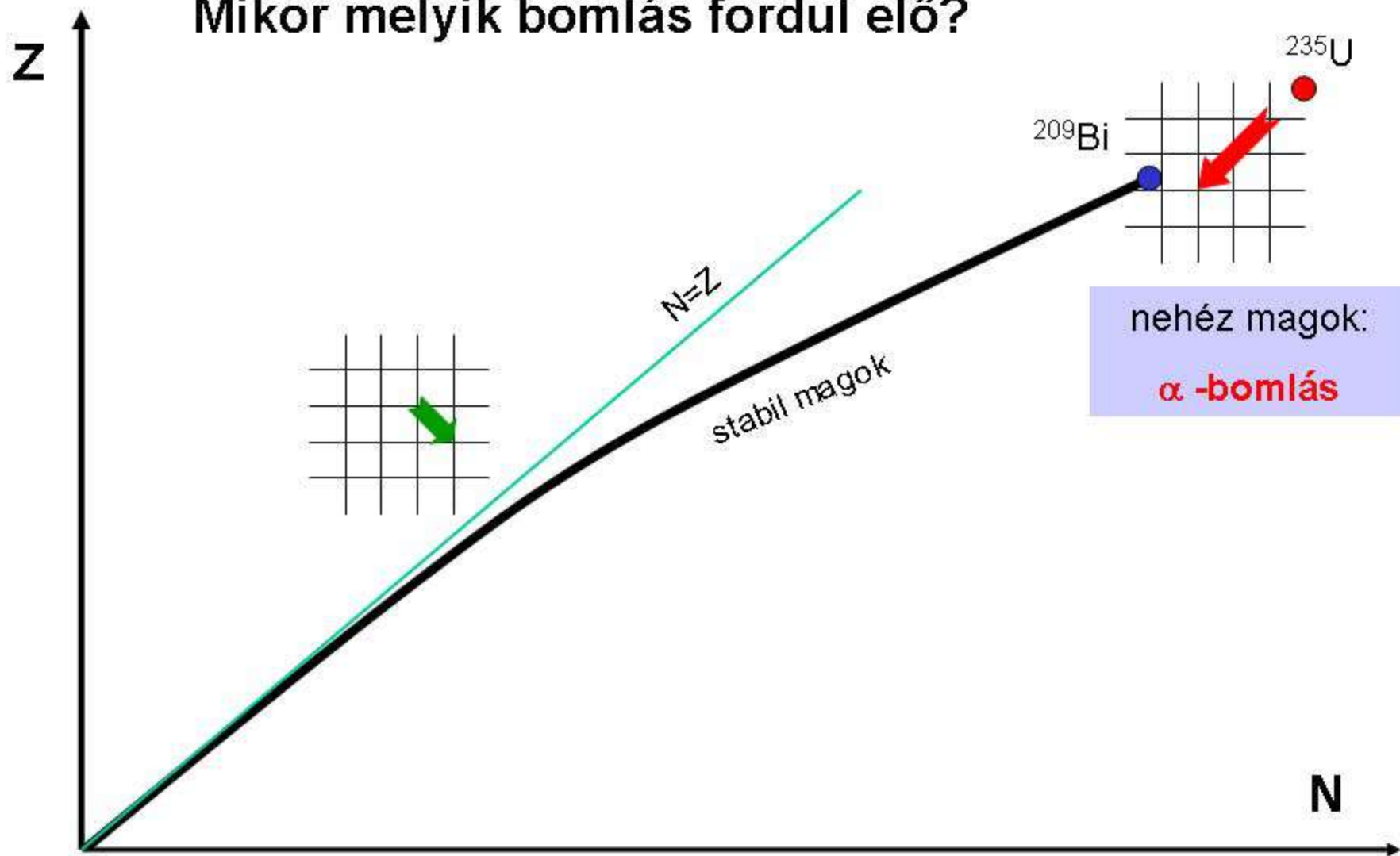
# Mikor melyik bomlás fordul elő?



# Mikor melyik bomlás fordul elő?

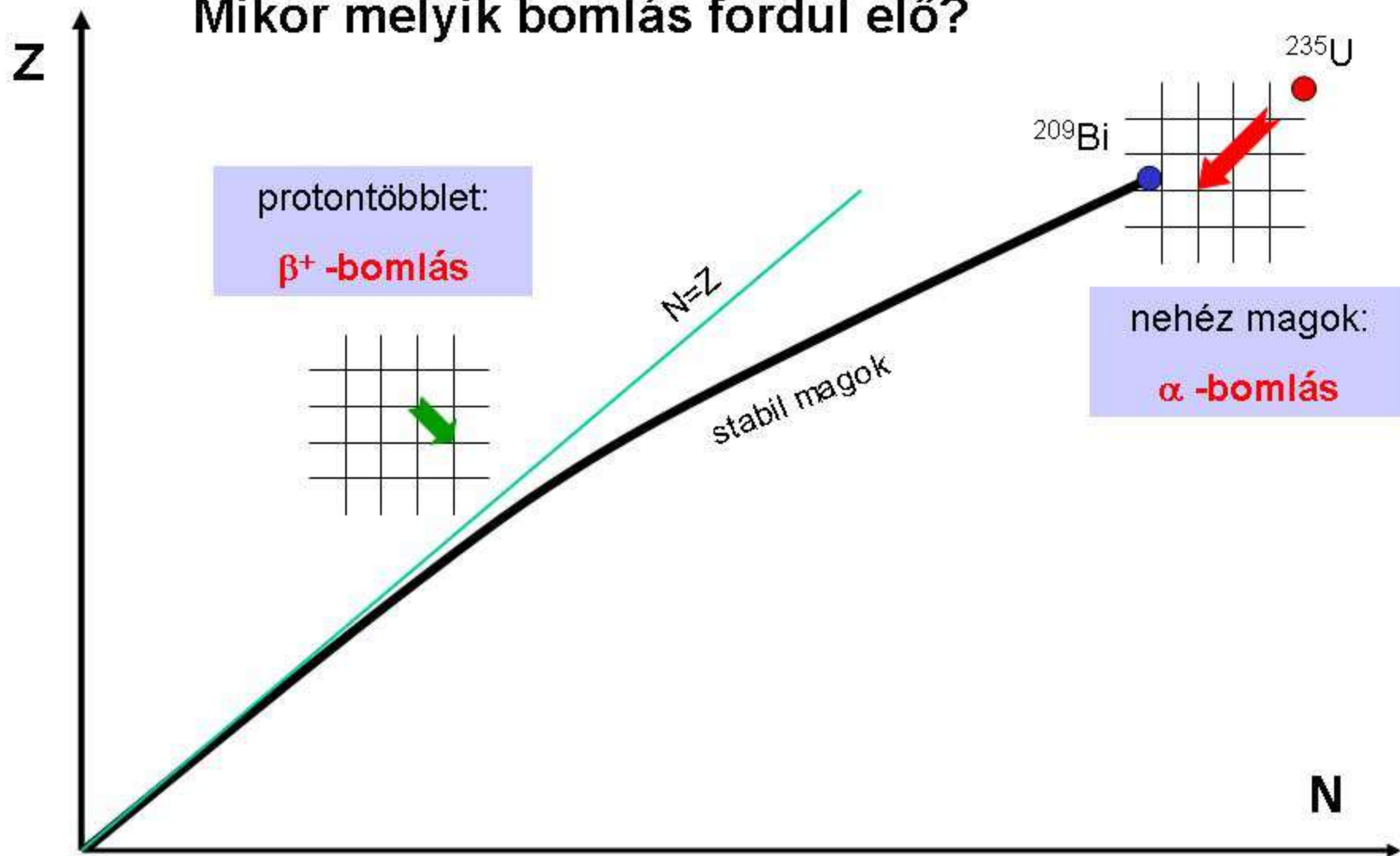


# Mikor melyik bomlás fordul elő?

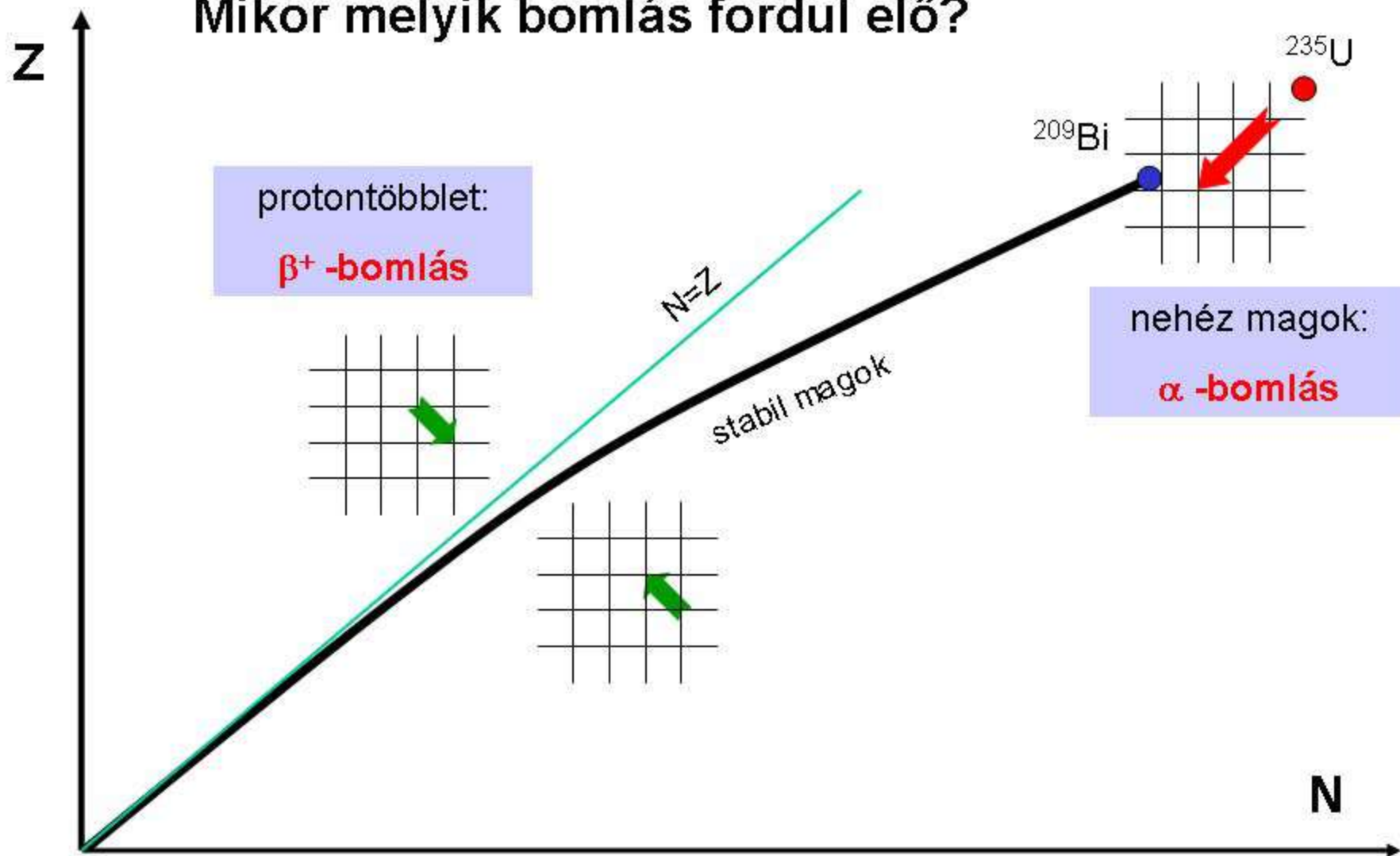




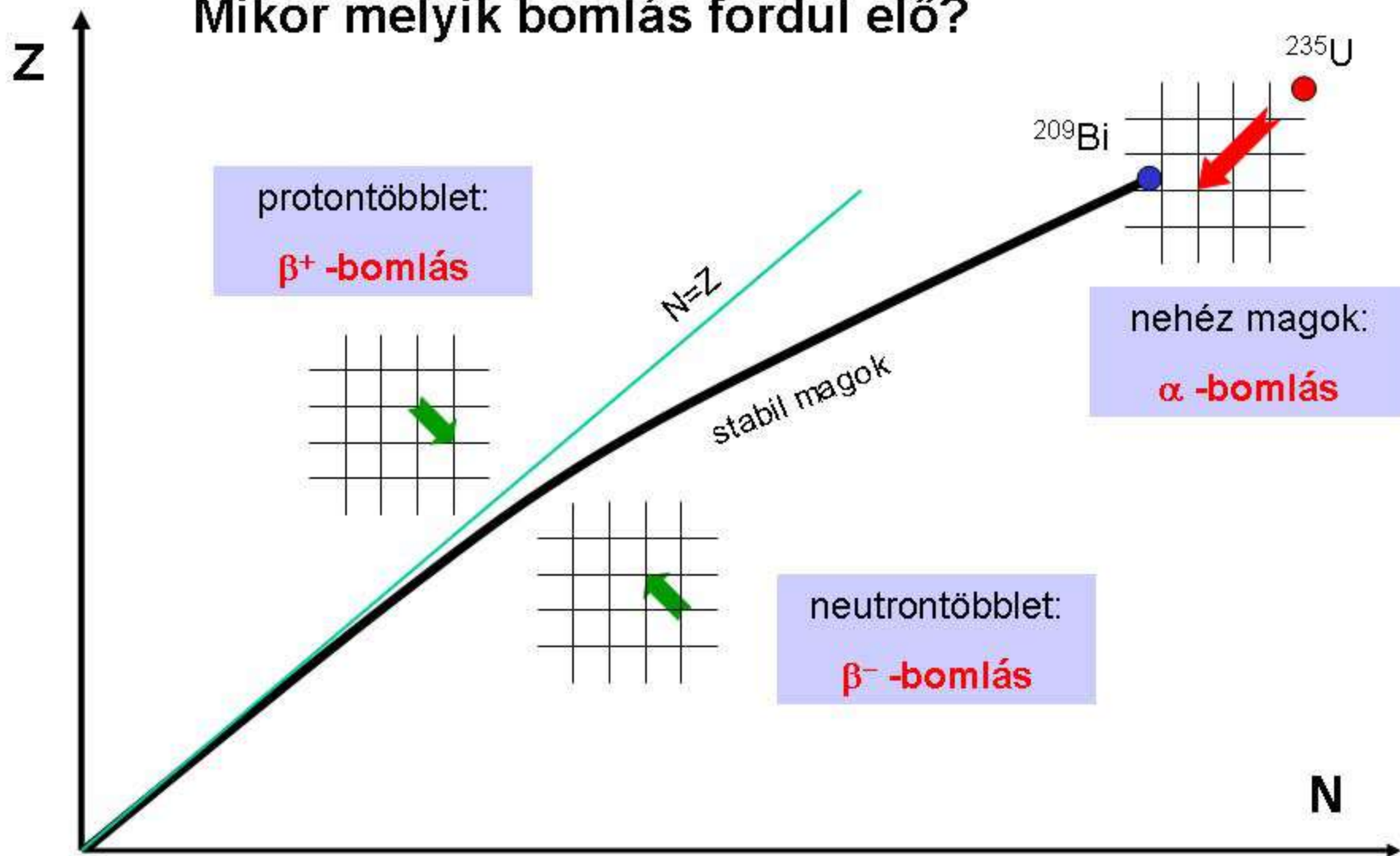
# Mikor melyik bomlás fordul elő?



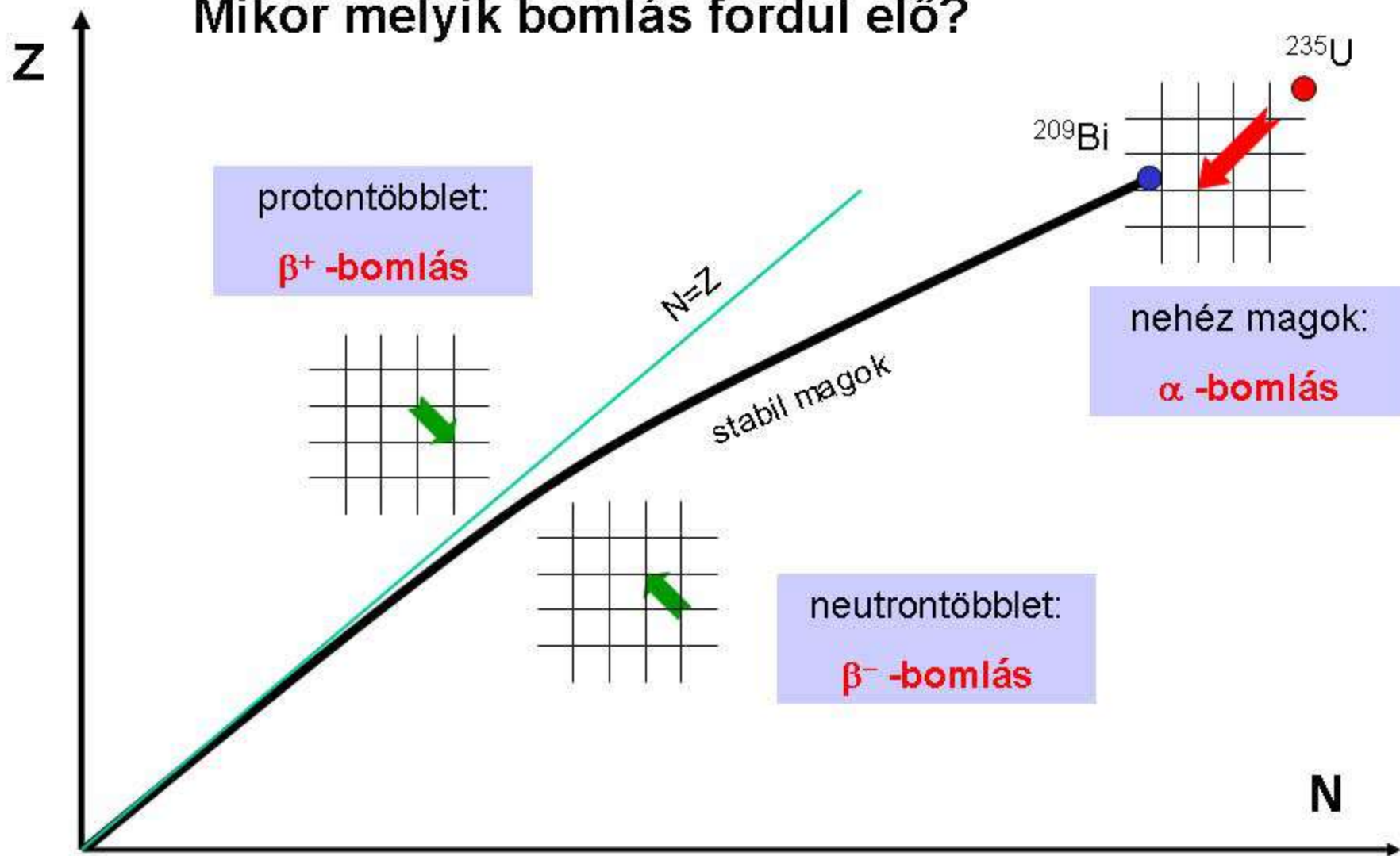
# Mikor melyik bomlás fordul elő?



# Mikor melyik bomlás fordul elő?



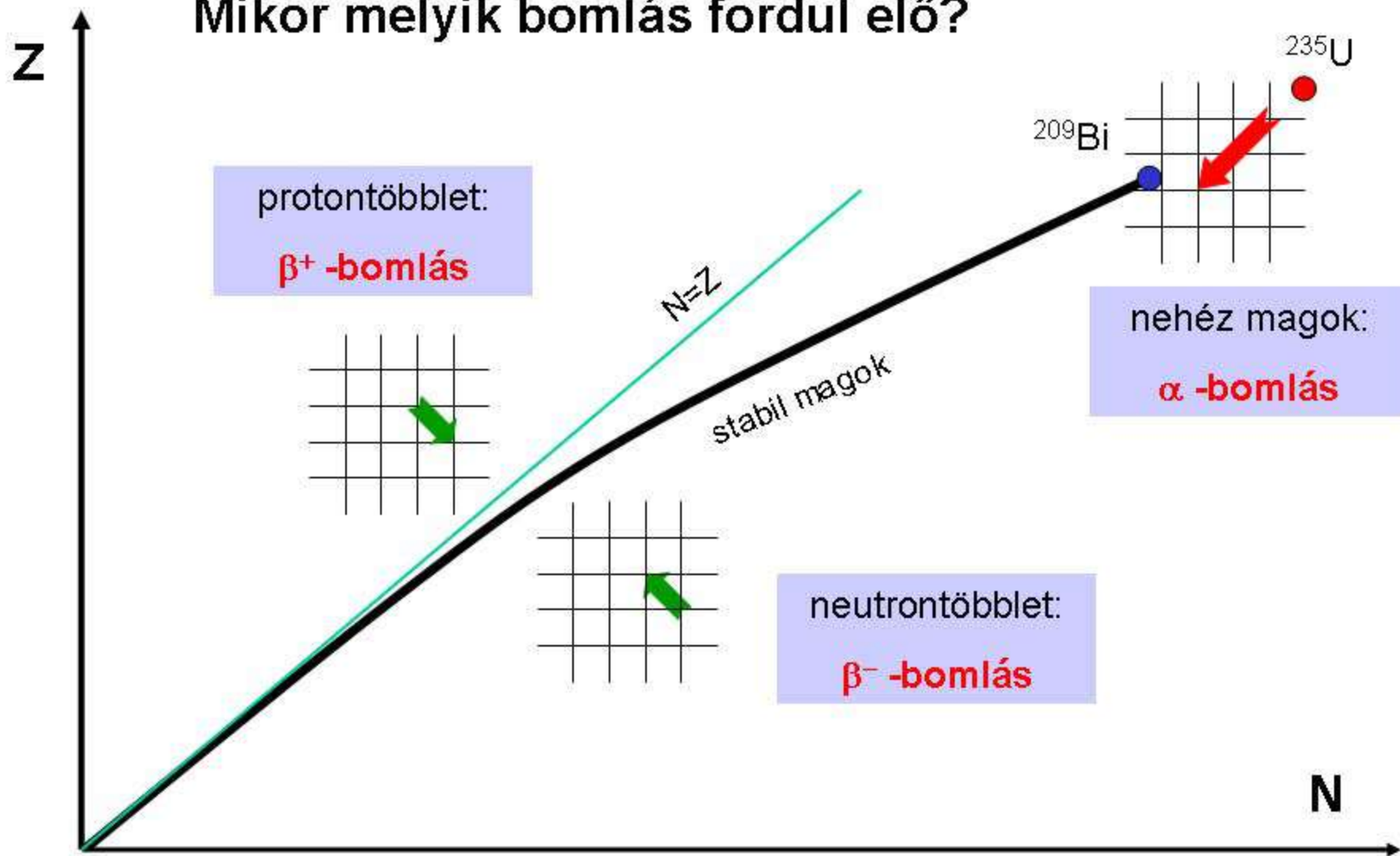
# Mikor melyik bomlás fordul elő?



$\gamma$ -bomlás:



# Mikor melyik bomlás fordul elő?



protontöbblet:

$\beta^+$ -bomlás

nehéz magok:

$\alpha$ -bomlás

neutrontöbblet:

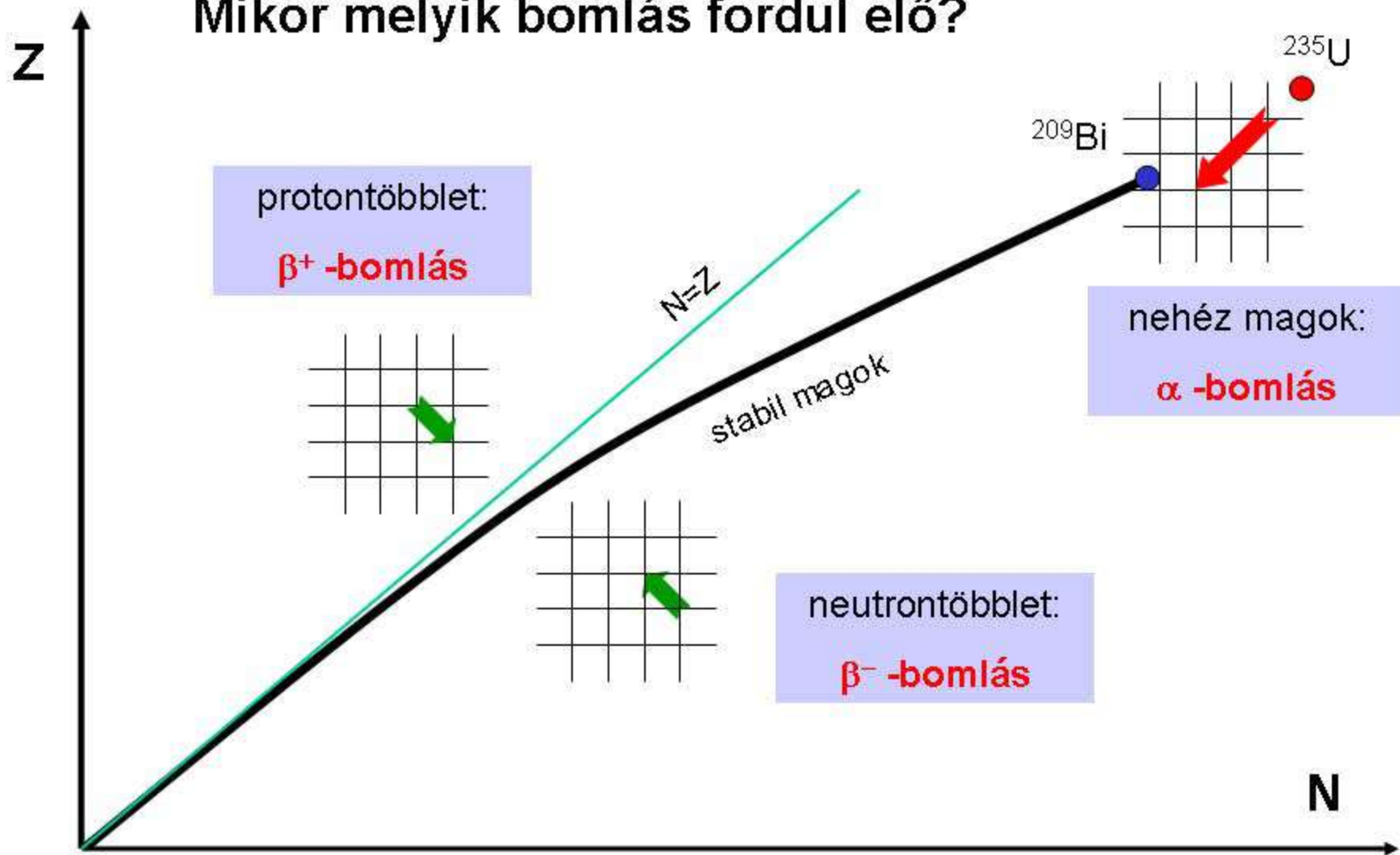
$\beta^-$ -bomlás

$\gamma$ -bomlás:

ugyanazon atommag „rezgő”, gerjesztett állapotából alapállapotba



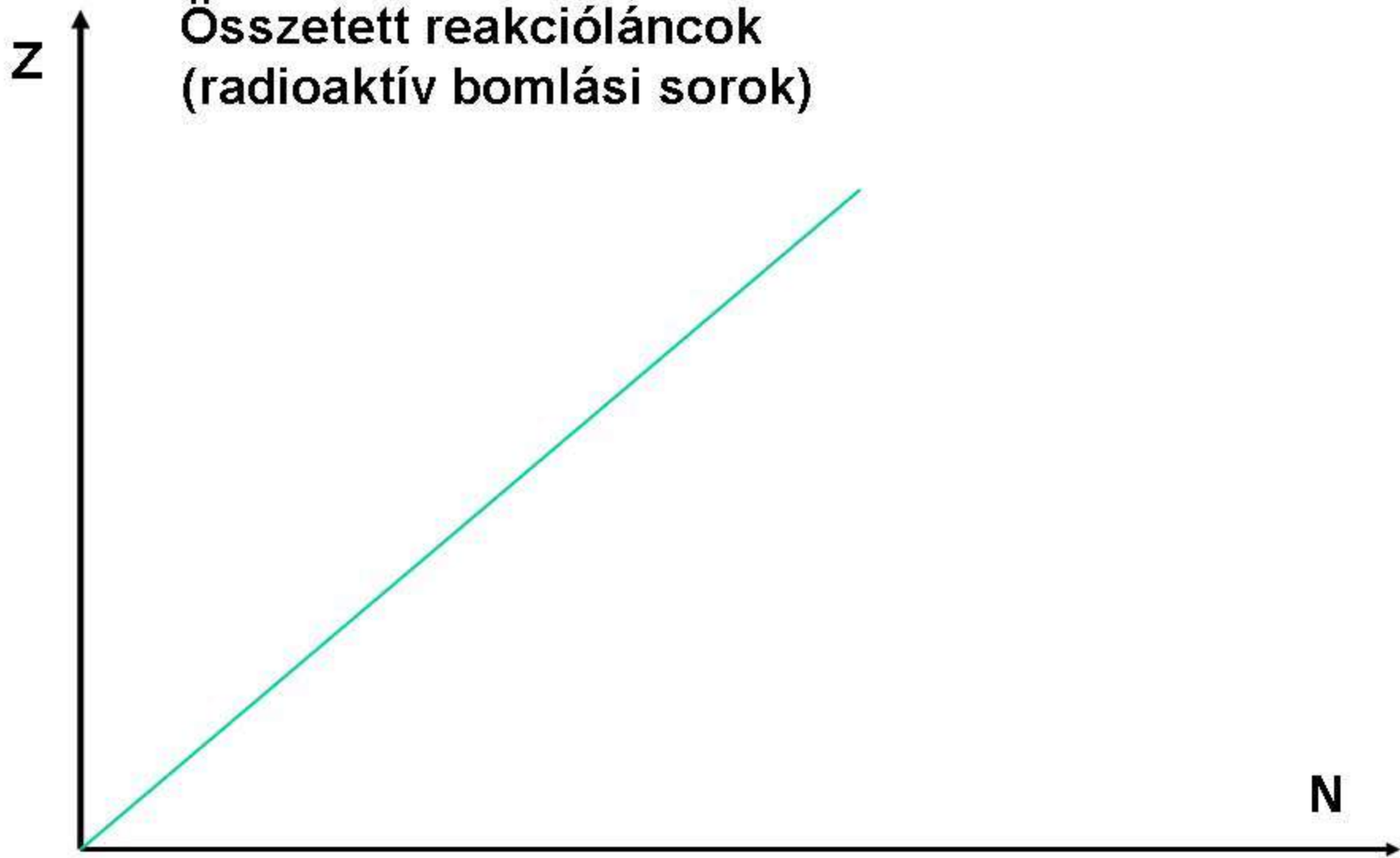
# Mikor melyik bomlás fordul elő?



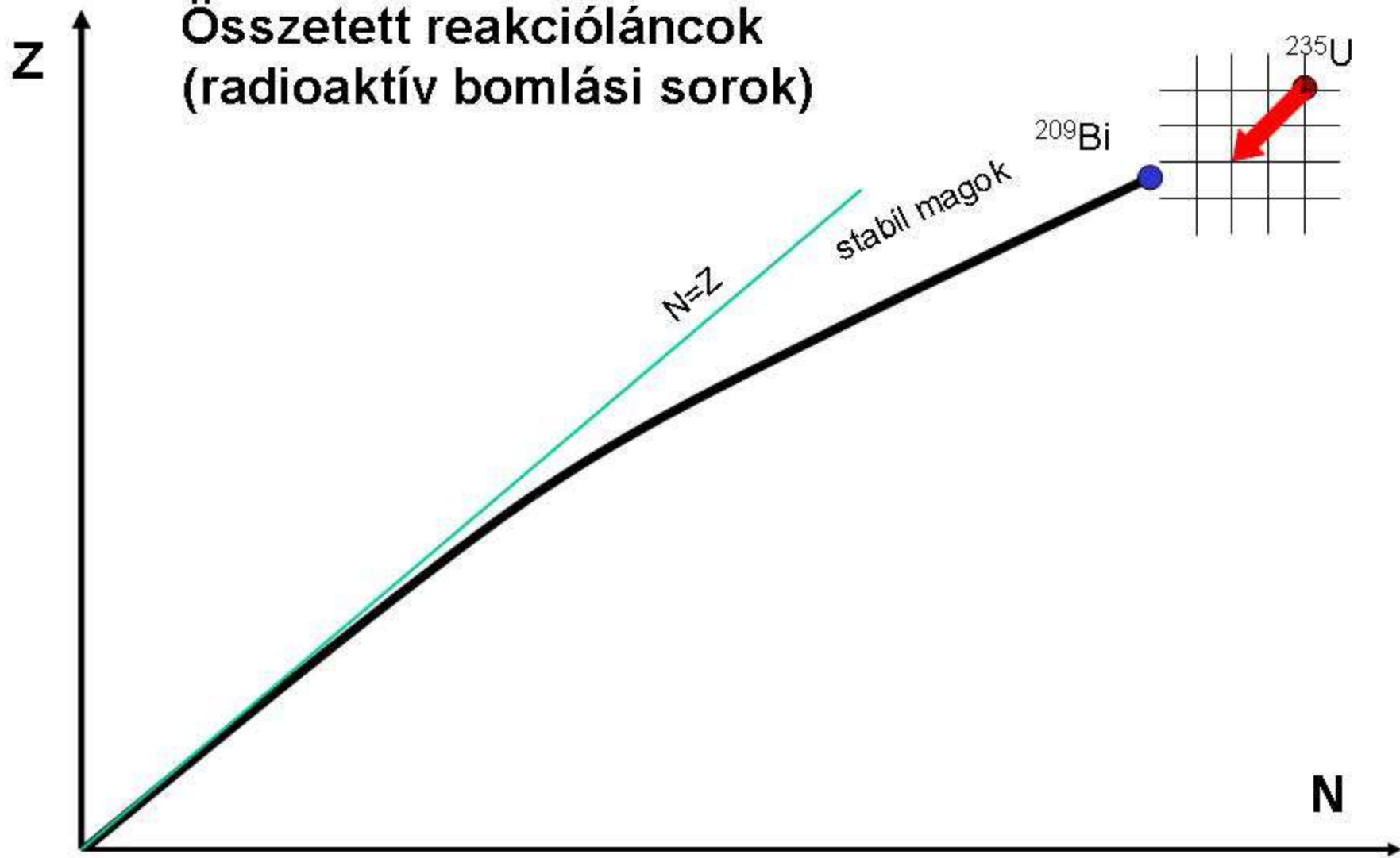
**$\gamma$ -bomlás:** ugyanazon atommag „rezgő”, gerjesztett állapotából alapállapotba  
Z és N nem változik, foton viszi el az energiát



## Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)

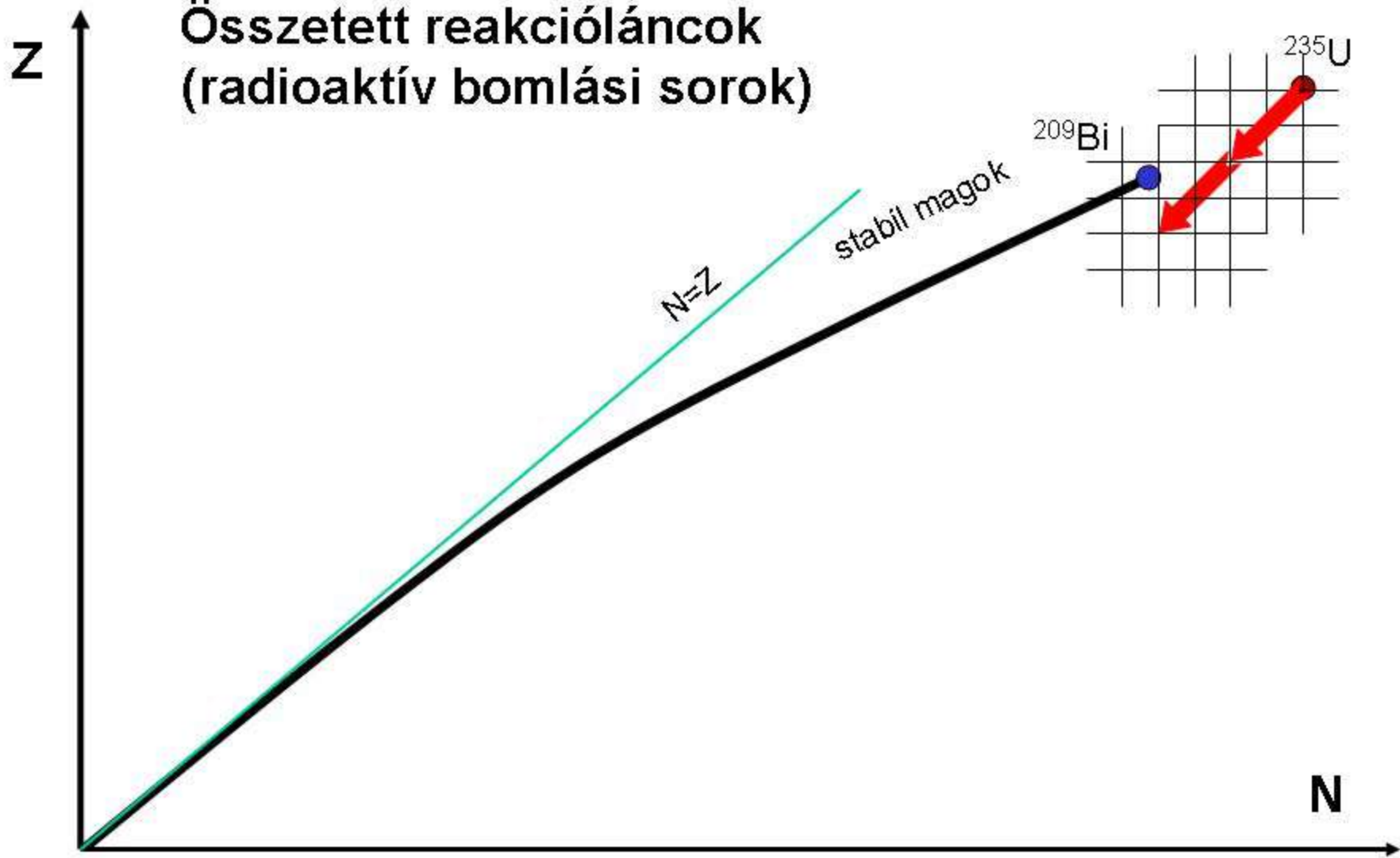


# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)

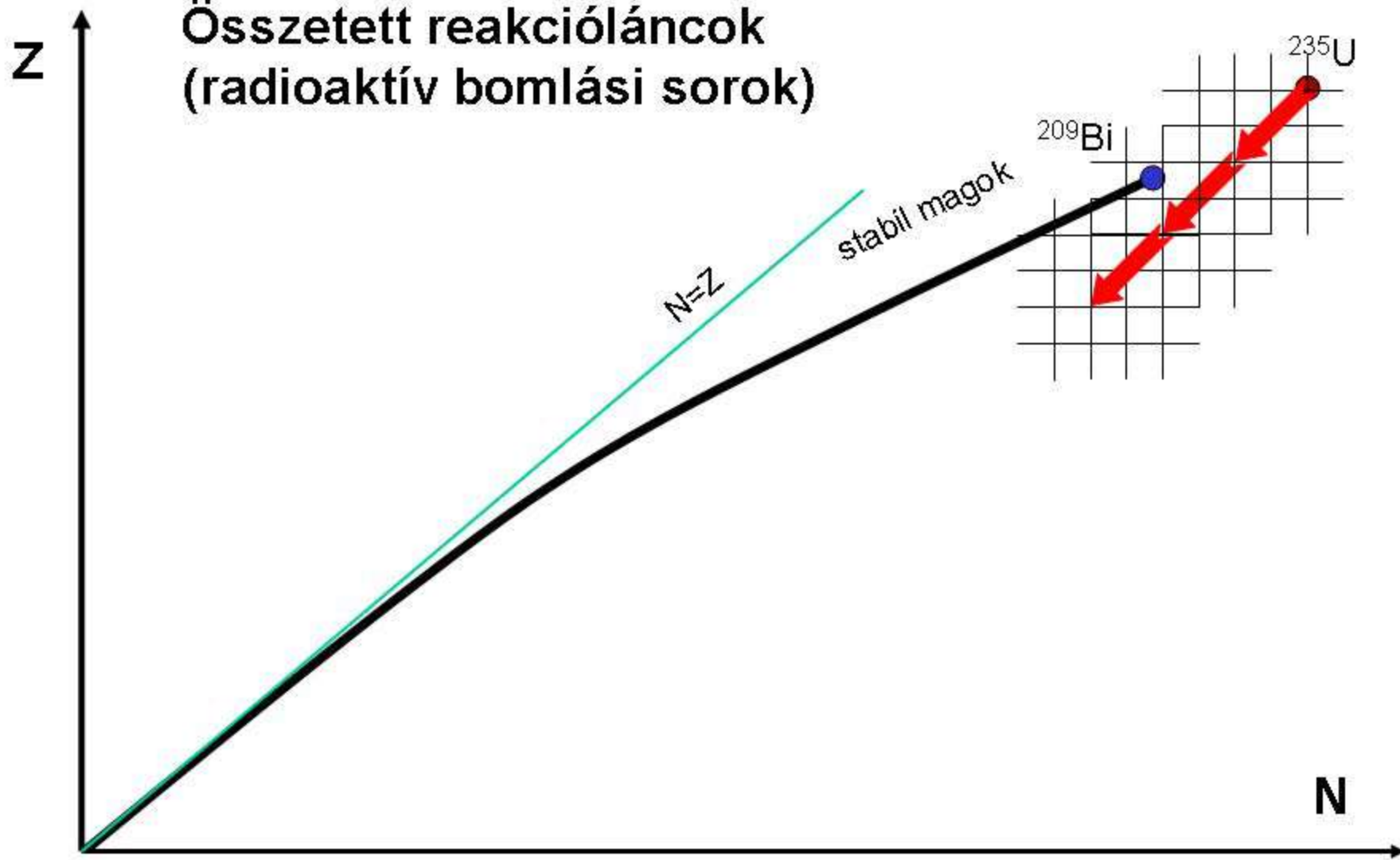




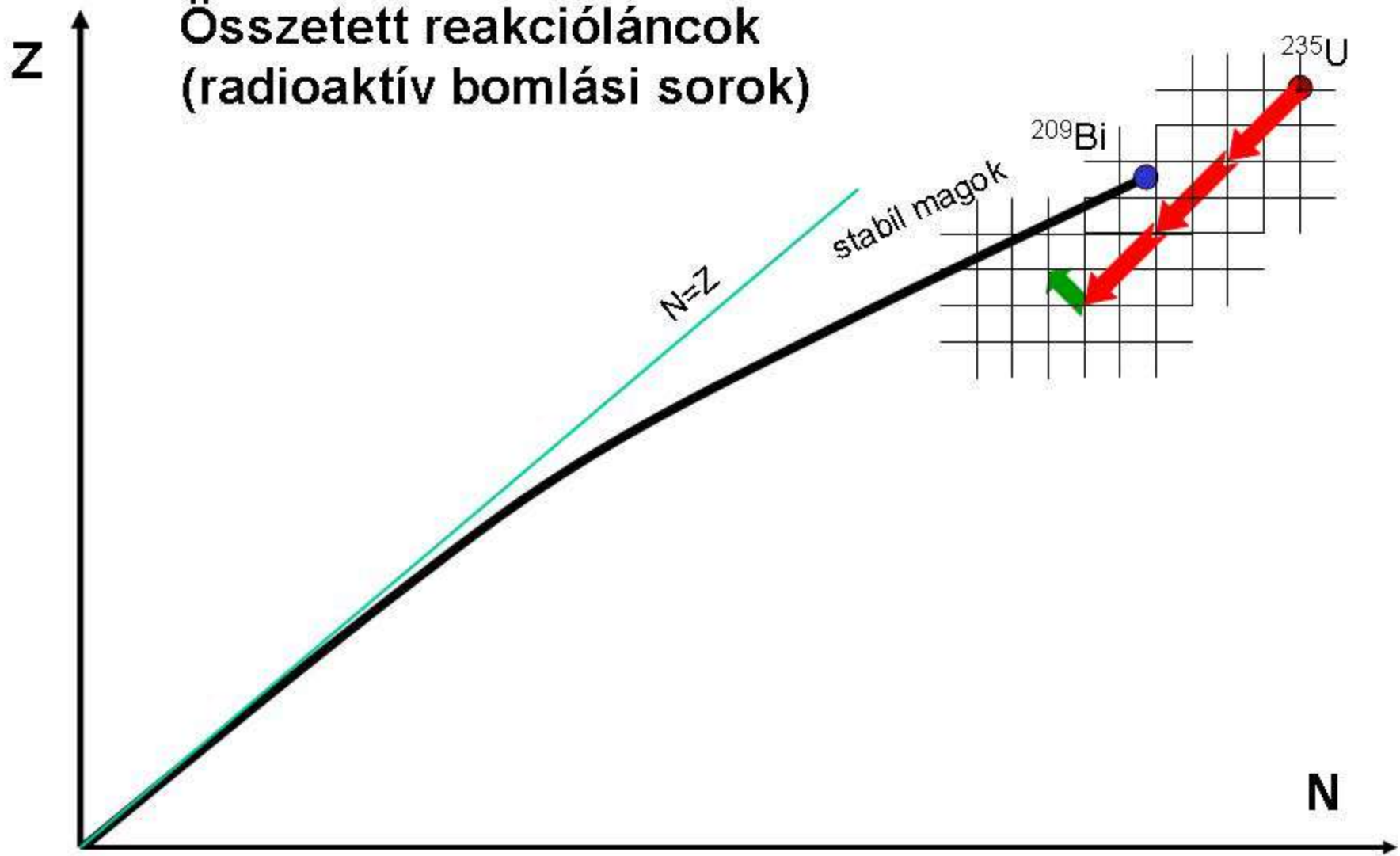
# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)



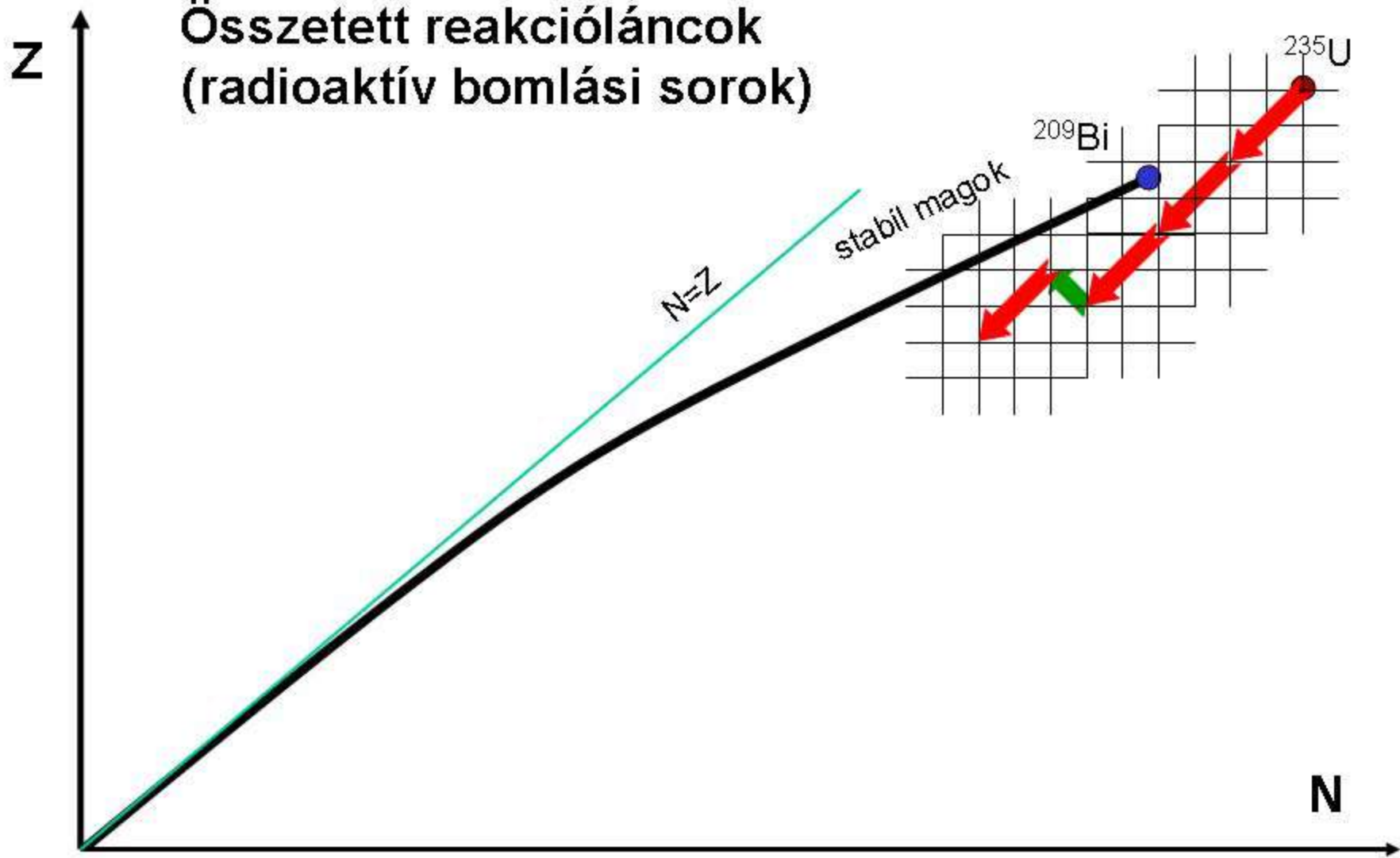
# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)



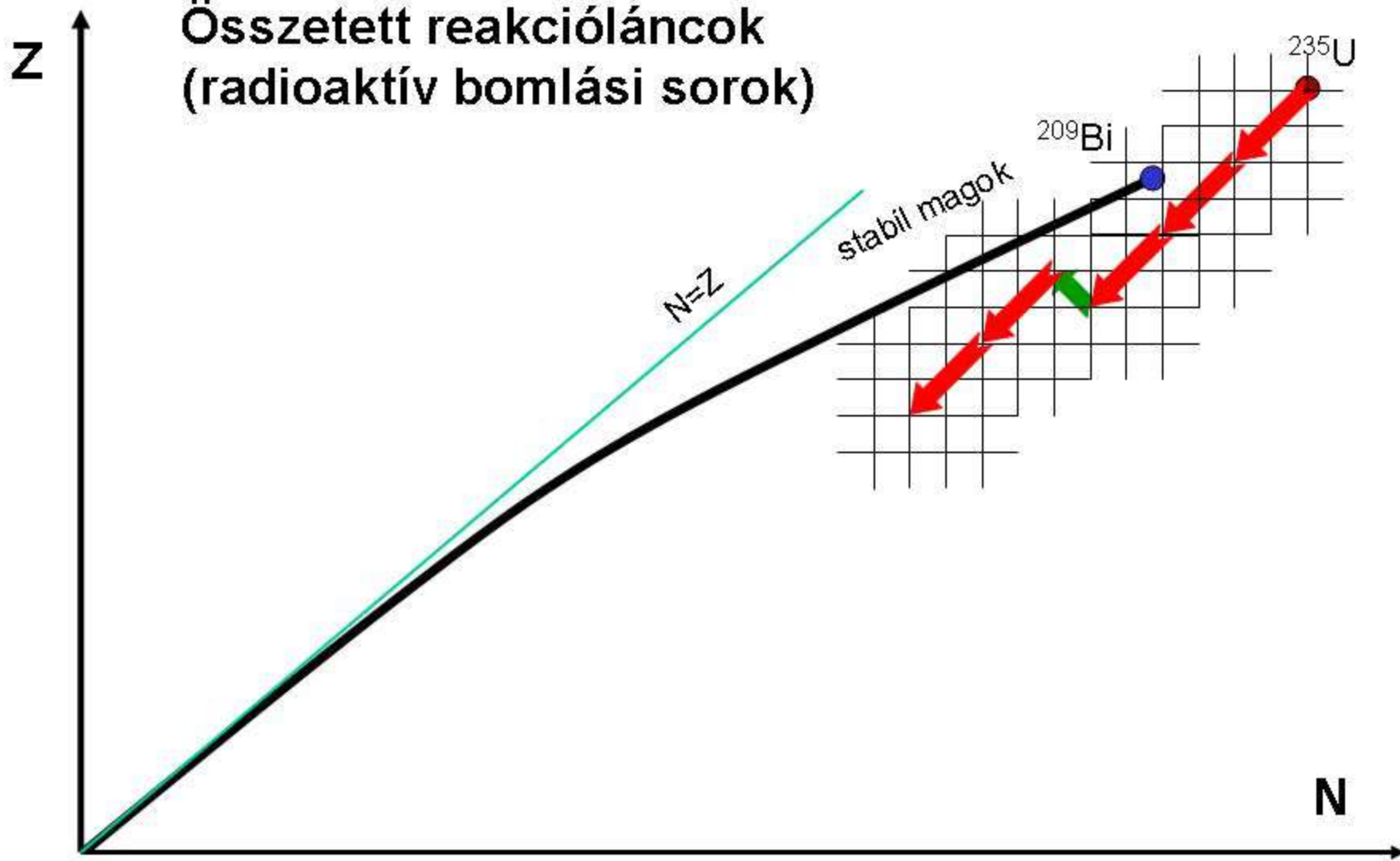
# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)



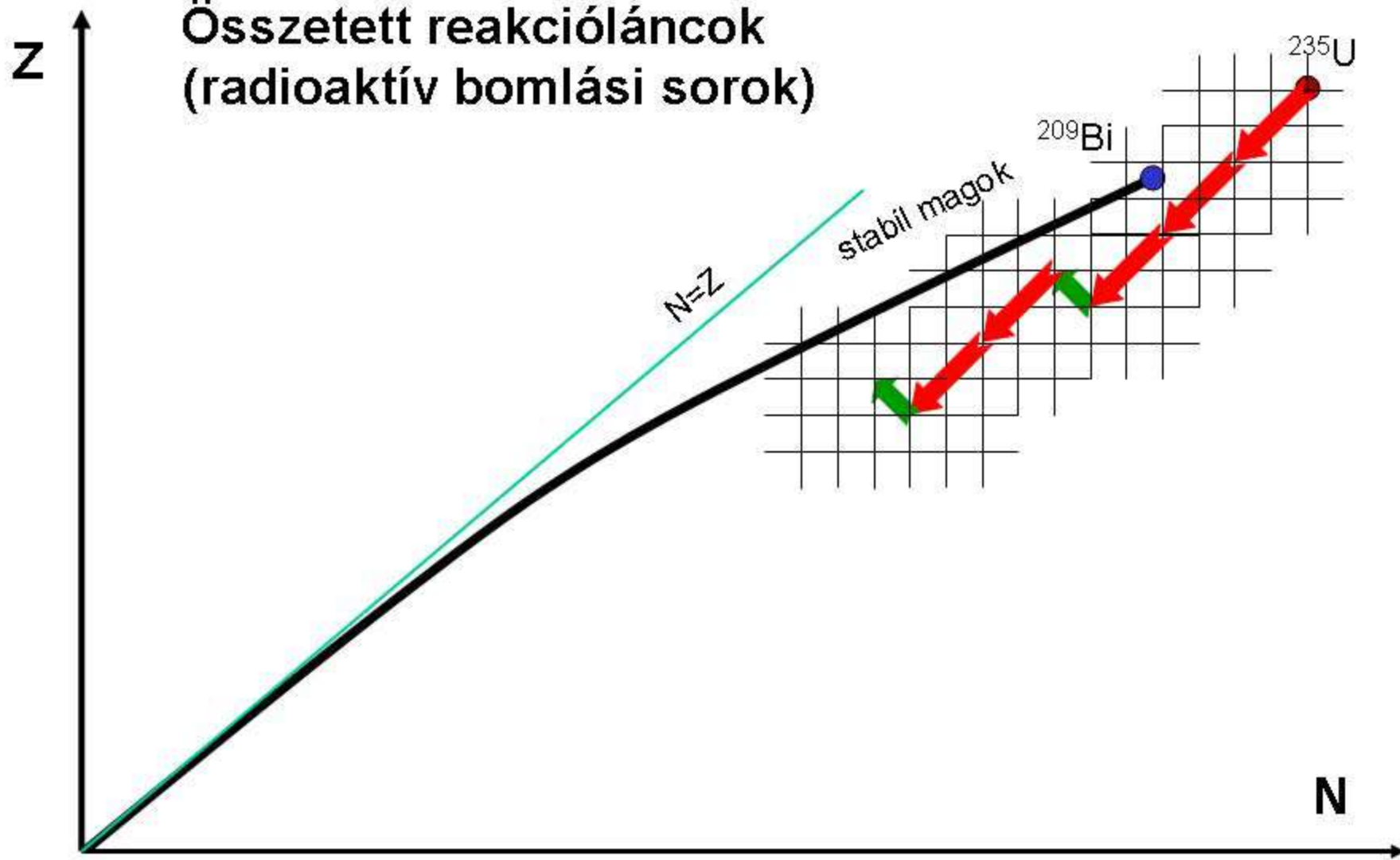
# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)



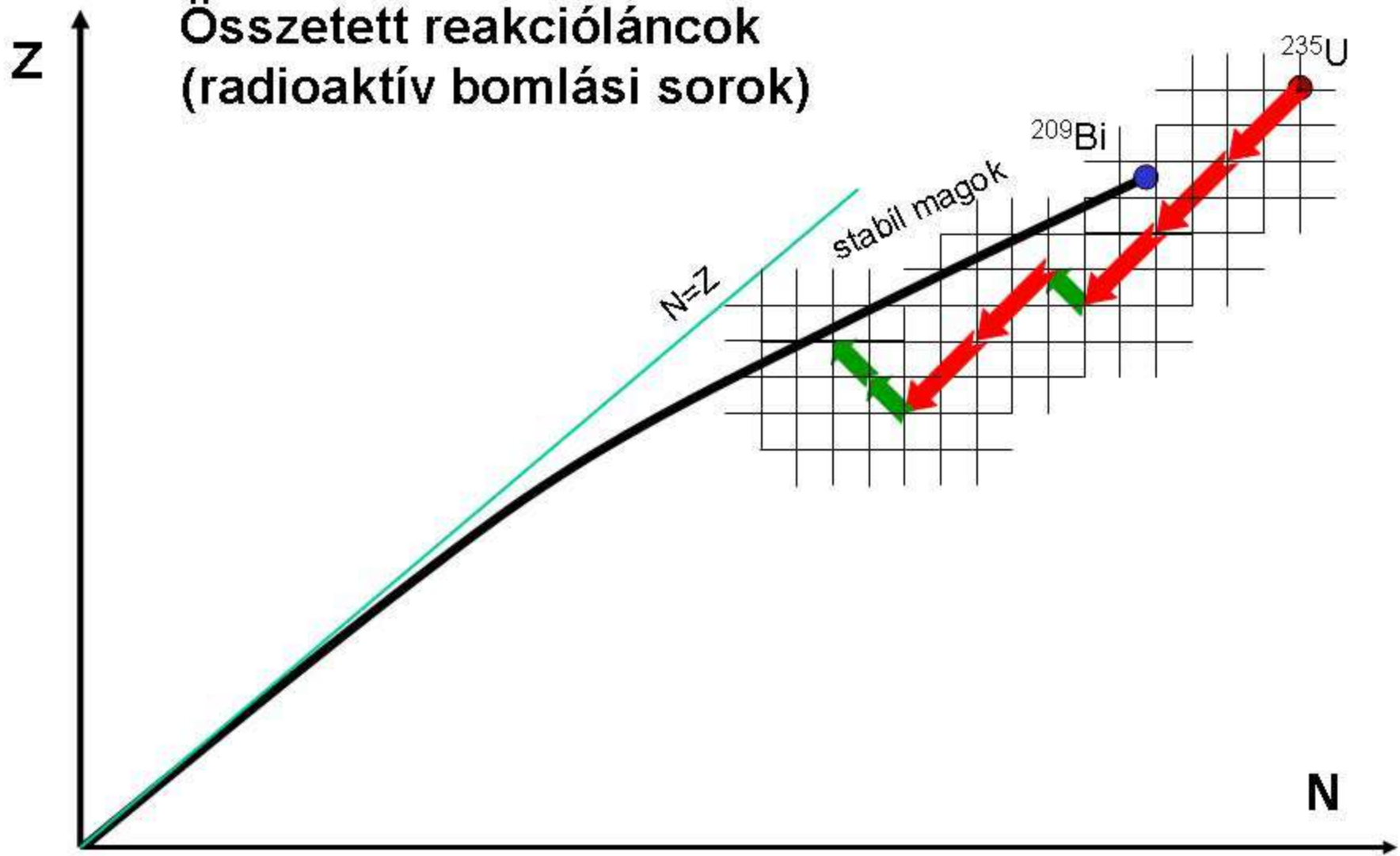
# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)



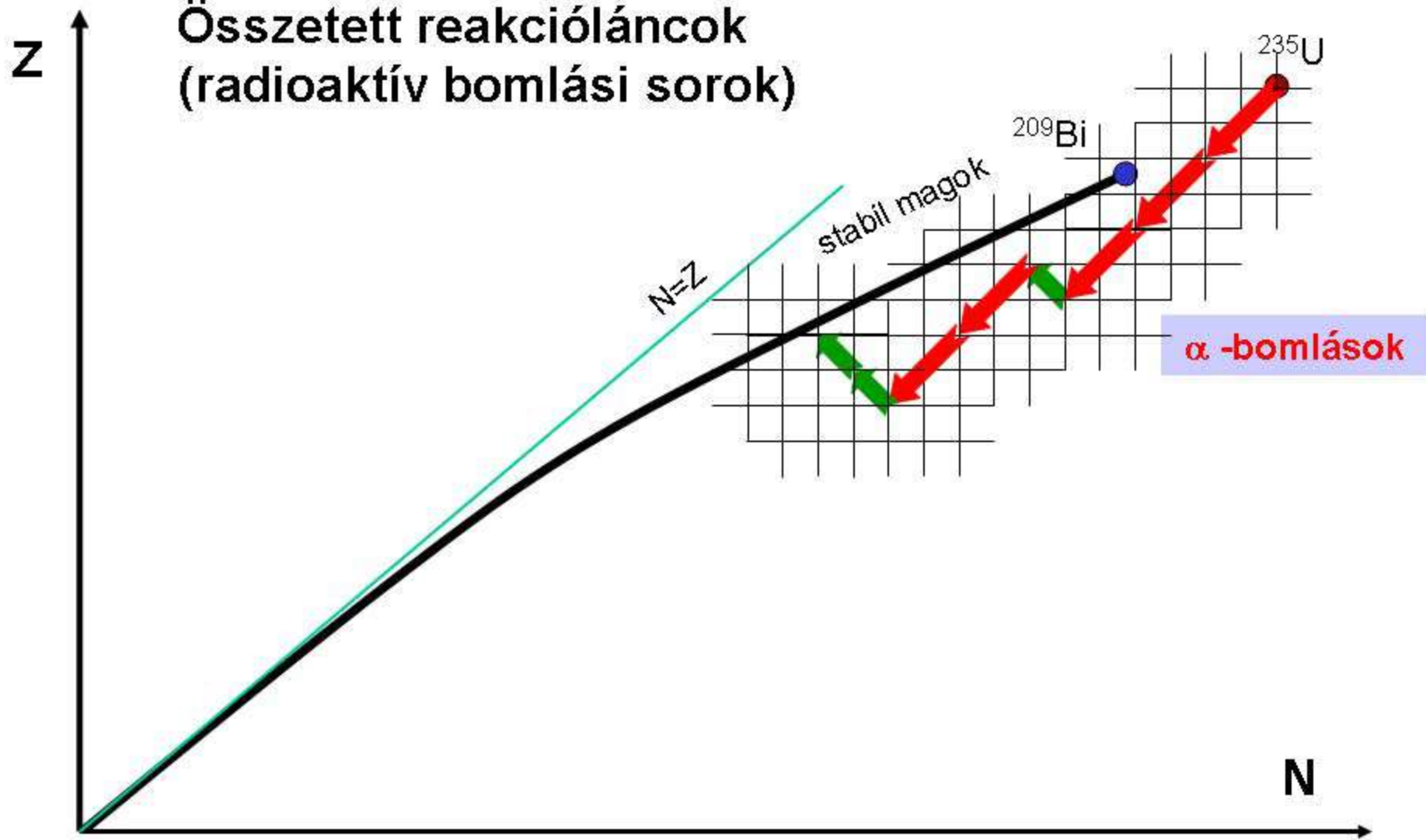
# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)



# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)

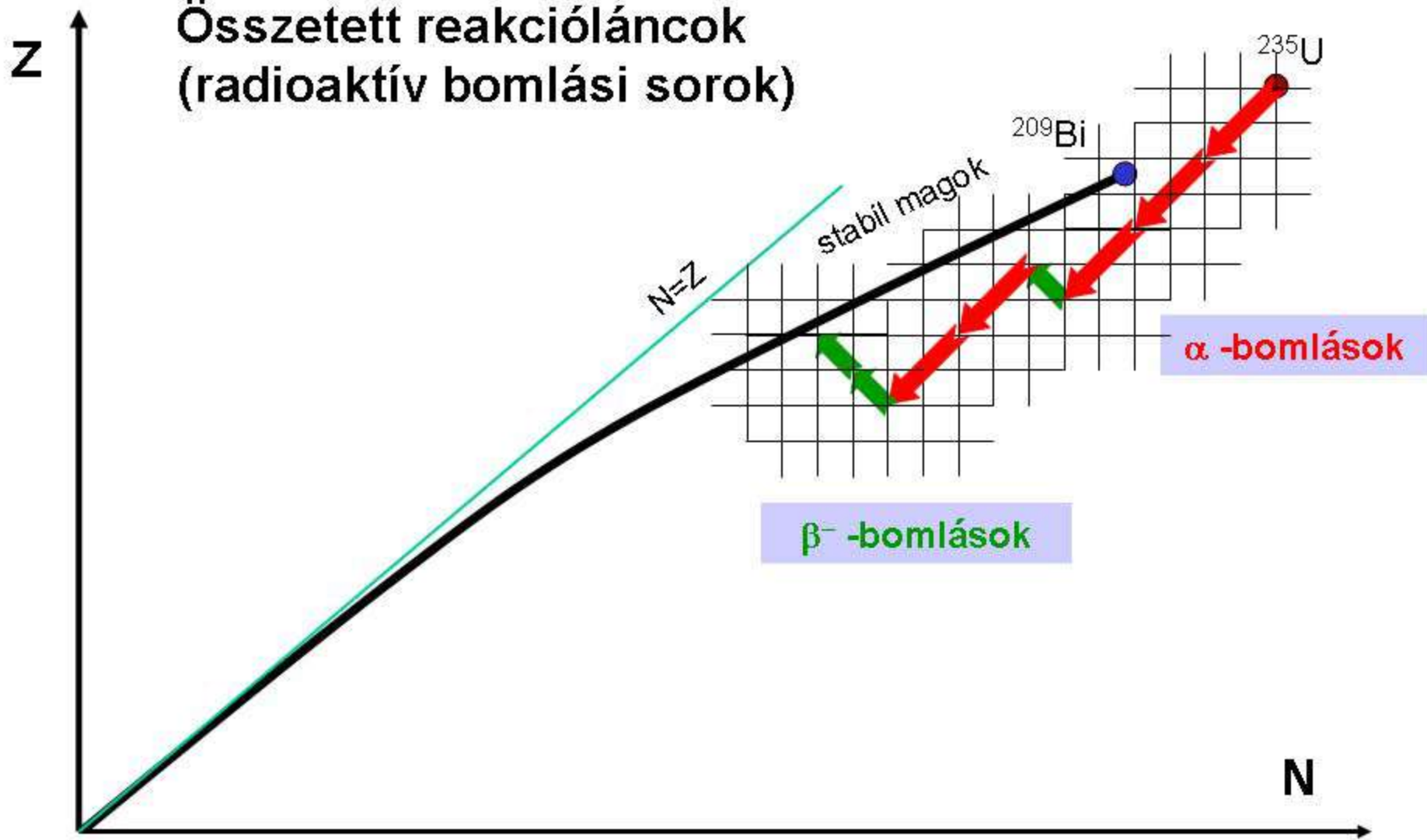


# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)





# Összetett reakcióláncok (radioaktív bomlási sorok)



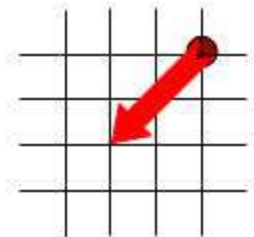
## Elágazó reakcióláncok



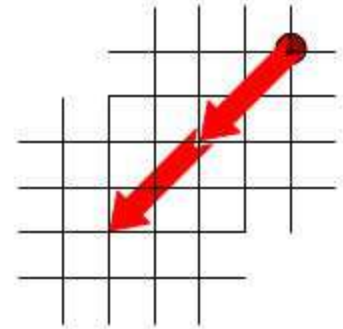
## Elágazó reakcióláncok



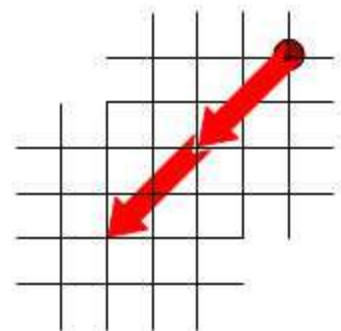
## Elágazó reakcióláncok



## Elágazó reakcióláncok



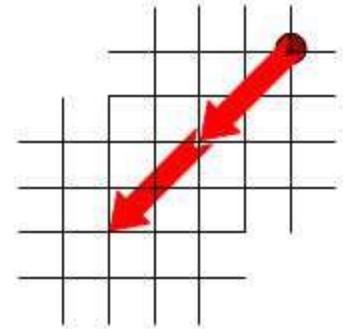
## Elágazó reakcióláncok



$\alpha$  -bomlások



# Elágazó reakcióláncok

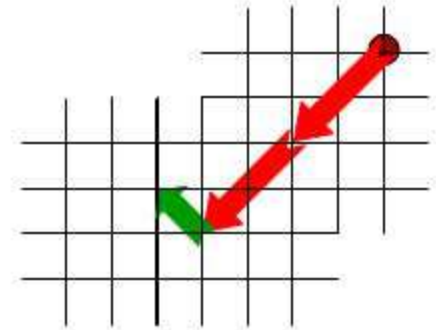


$\alpha$  -bomlások

$\beta^-$  -bomlások



## Elágazó reakcióláncok



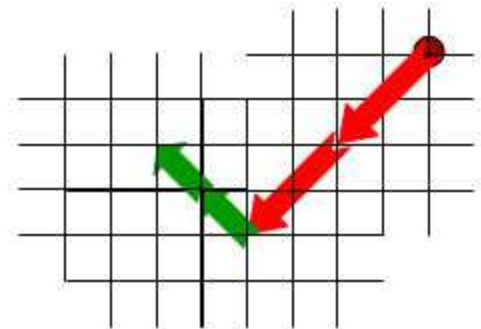
$\alpha$  -bomlások

$\beta^-$  -bomlások





# Elágazó reakcióláncok

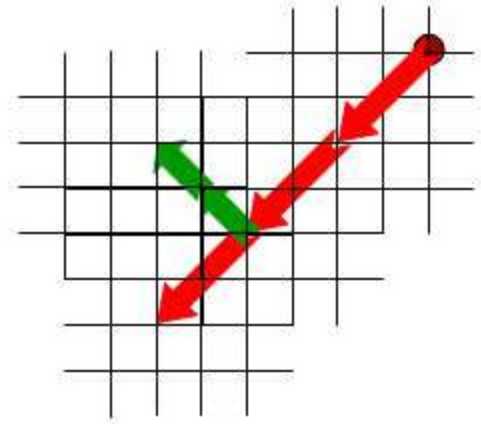


$\alpha$  -bomlások

$\beta^-$  -bomlások



# Elágazó reakcióláncok



$\alpha$  -bomlások

$\beta^-$  -bomlások



# Elágazó reakcióláncok

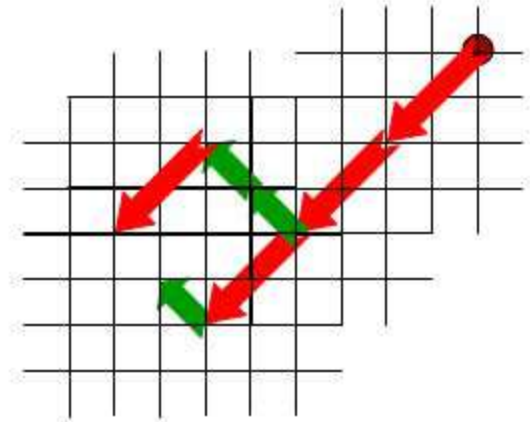


$\alpha$  -bomlások

$\beta^-$  -bomlások



## Elágazó reakcióláncok

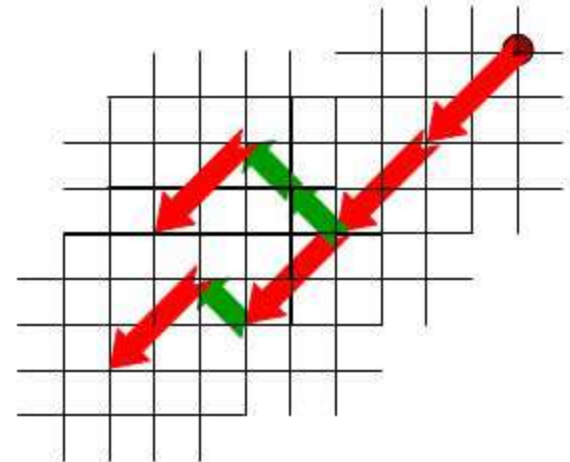


$\alpha$  -bomlások

$\beta^-$  -bomlások



# Elágazó reakcióláncok

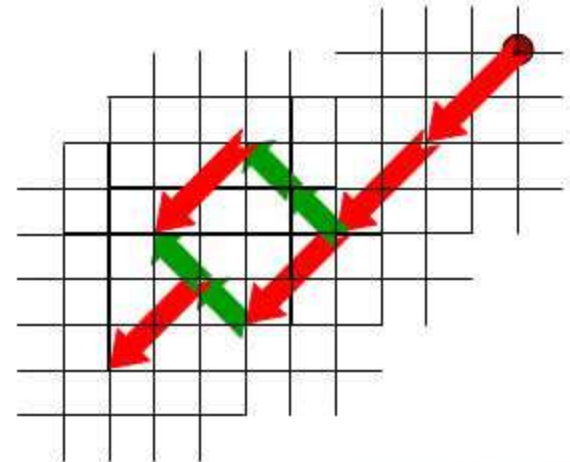


$\alpha$  -bomlások

$\beta^-$  -bomlások



# Elágazó reakcióláncok

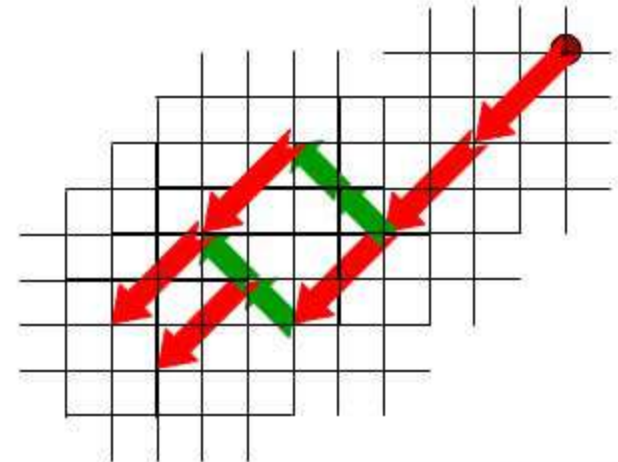


$\alpha$  -bomlások

$\beta^-$  -bomlások



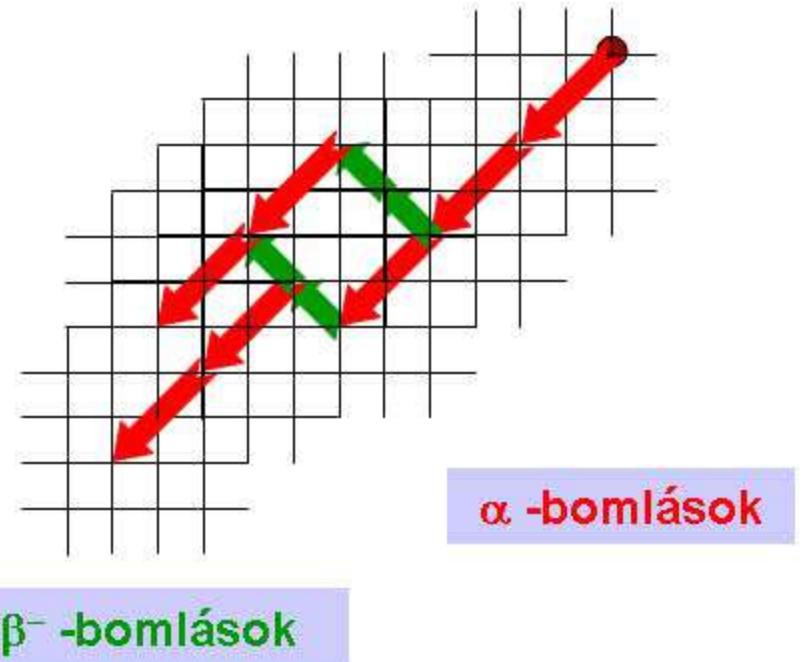
## Elágazó reakcióláncok



$\alpha$  -bomlások

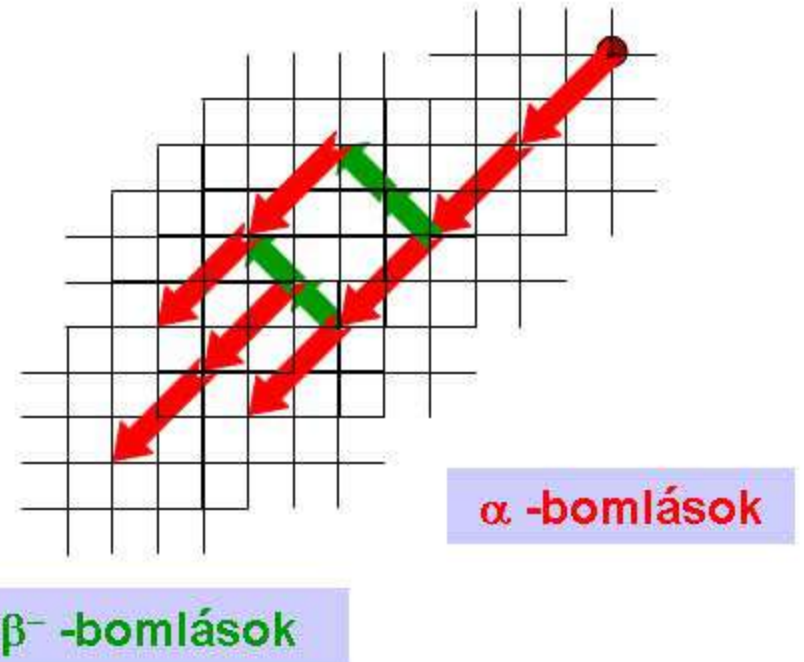
$\beta^-$  -bomlások

## Elágazó reakcióláncok

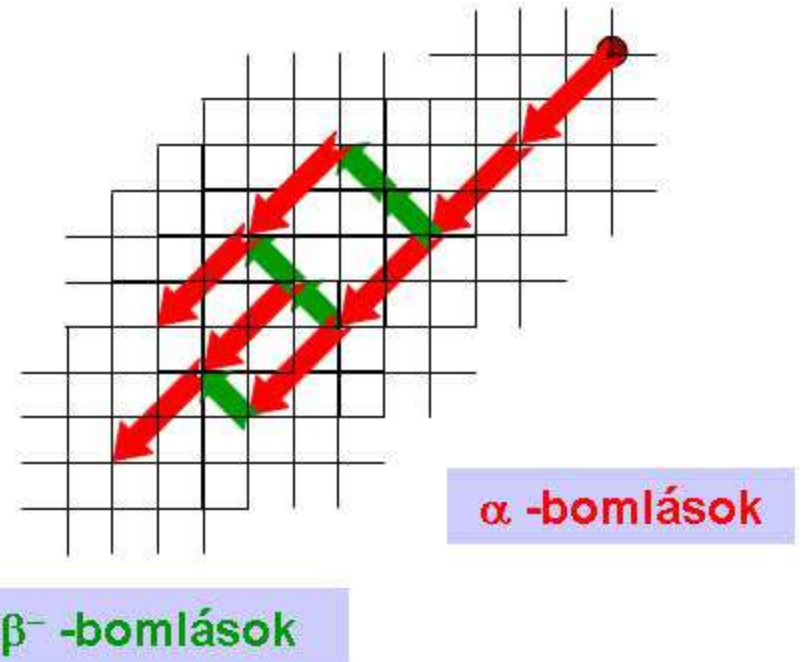




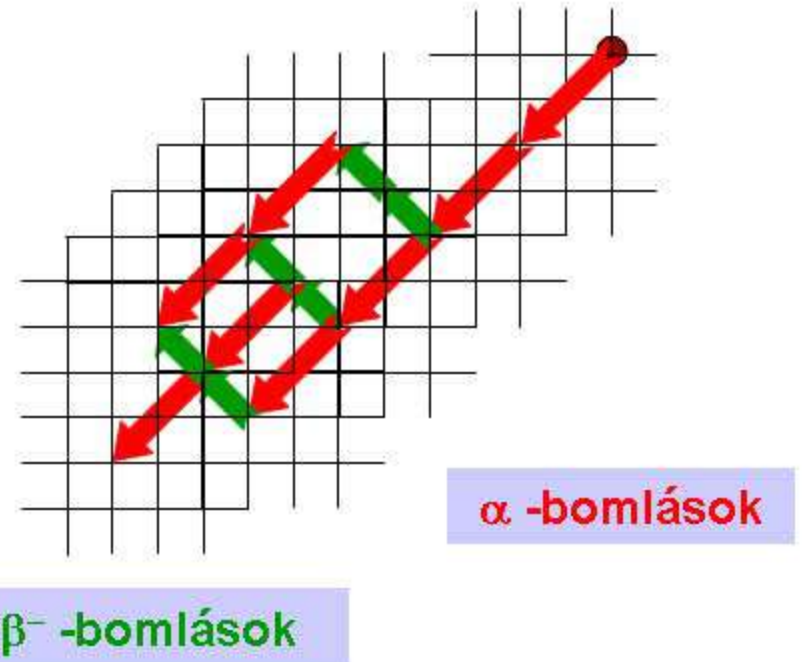
## Elágazó reakcióláncok



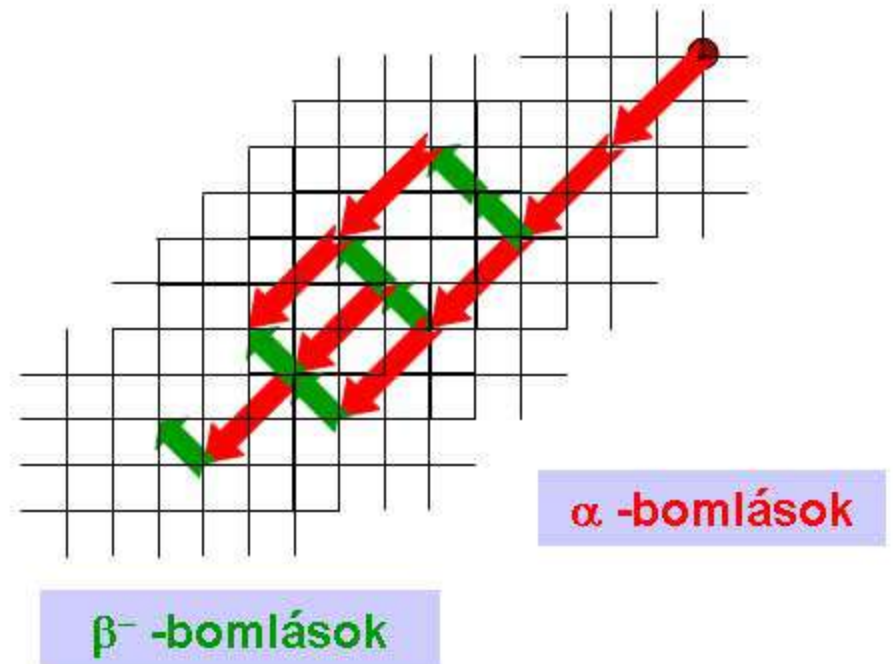
## Elágazó reakcióláncok



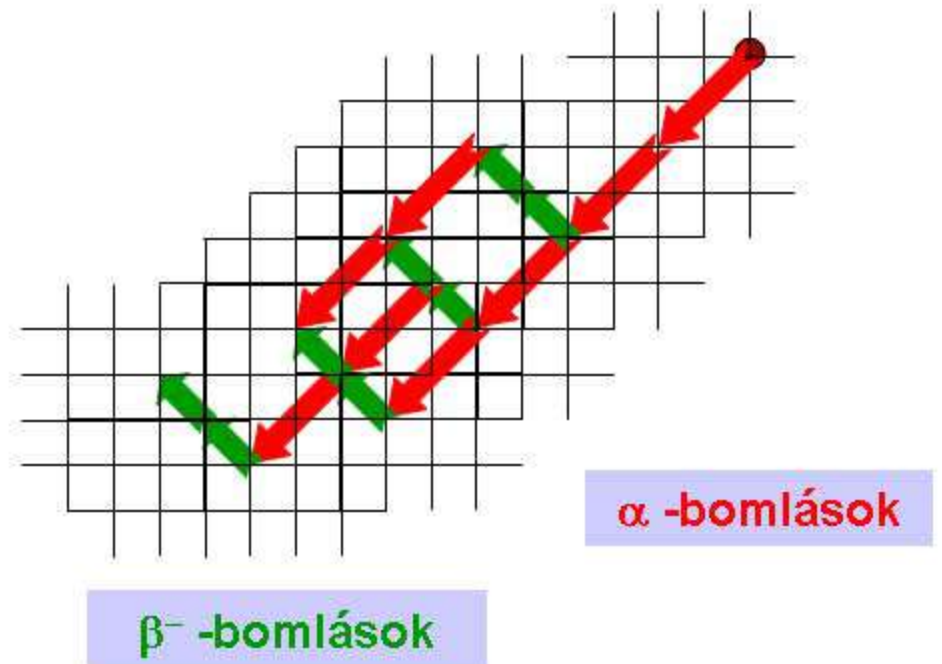
## Elágazó reakcióláncok



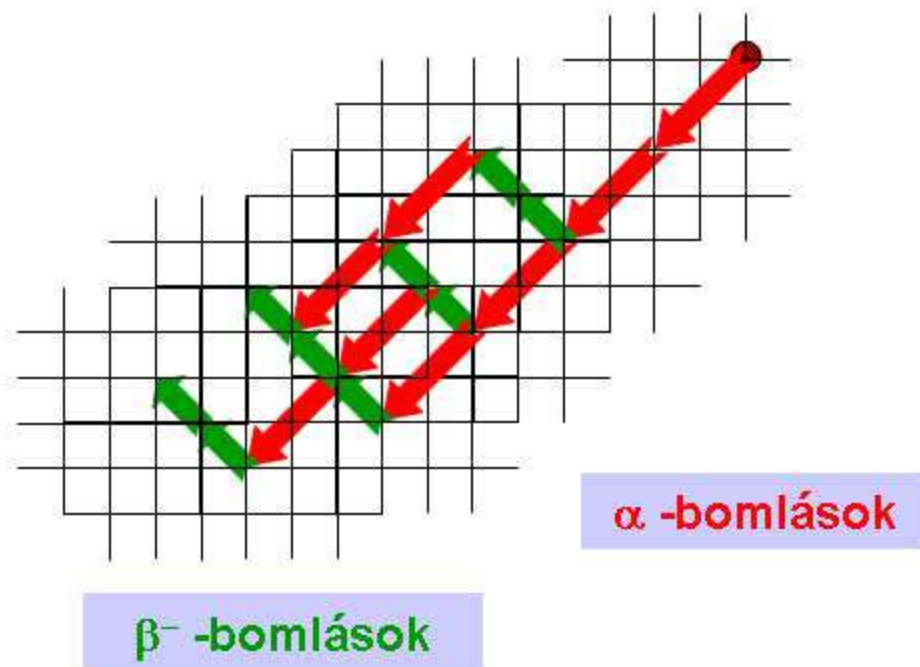
## Elágazó reakcióláncok



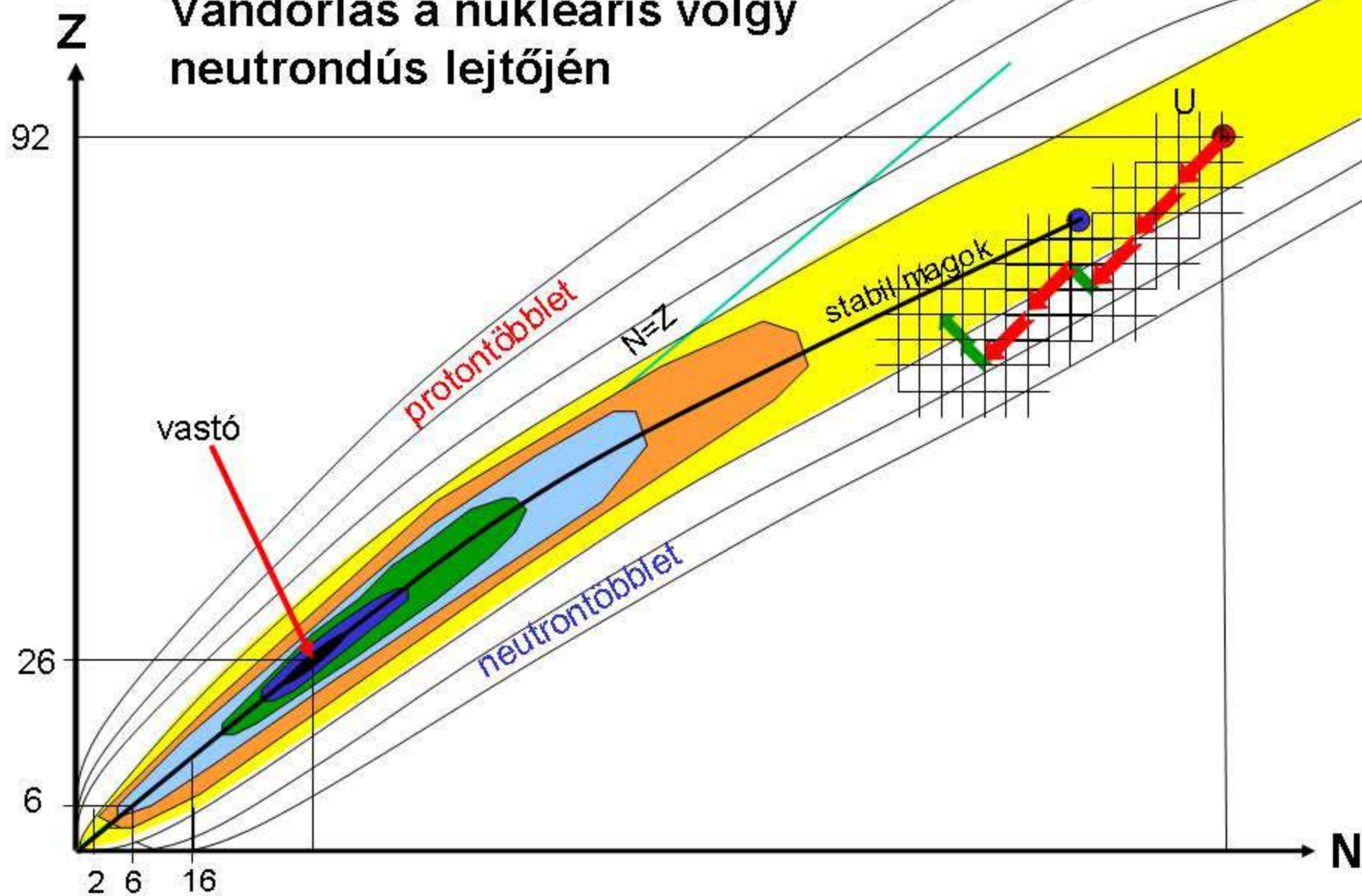
## Elágazó reakcióláncok



## Elágazó reakcióláncok



# Vándorlás a nukleáris völgy neutronsúlyos lejtőjén



# Drasztikus magátalakulás:





# Drasztikus magátalakulás: **MAGHASADÁS**



# Drasztikus magátalakulás: **MAGHASADÁS**

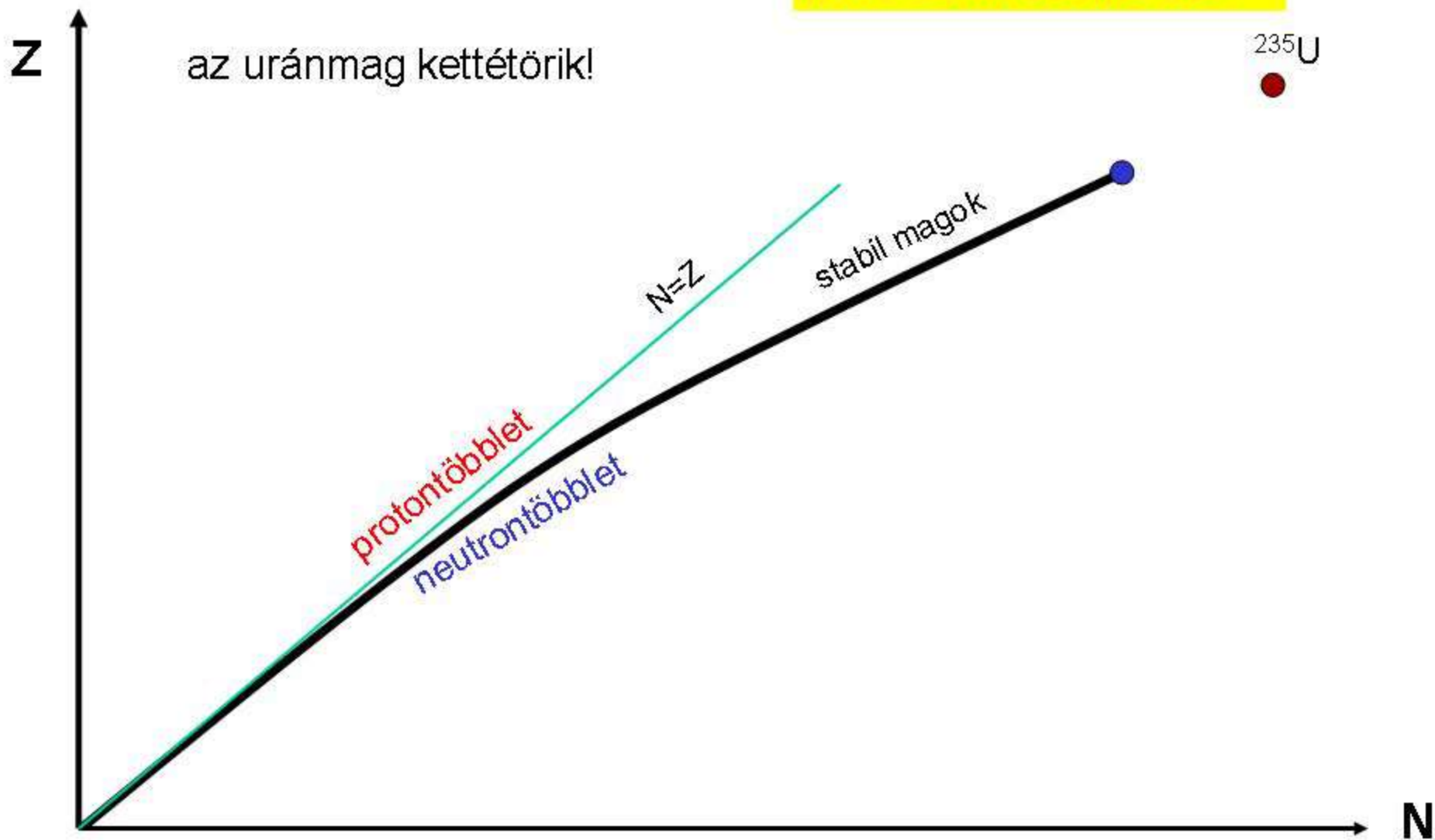
az uránmag kettétörik!



# Drasztikus magátalakulás:

# MAGHASADÁS

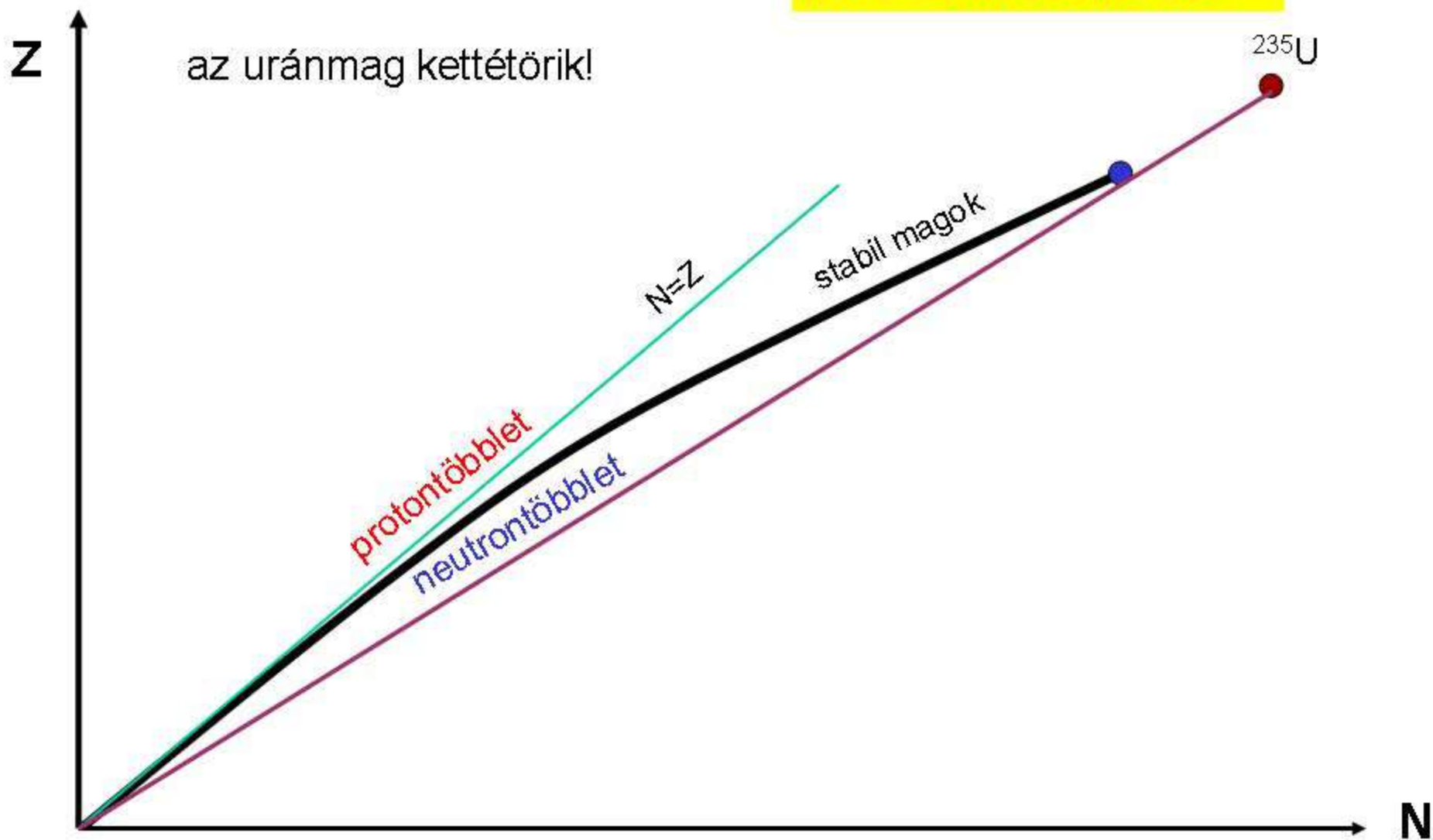
az uránmag kettétörzik!



# Drasztikus magátalakulás:

# MAGHASADÁS

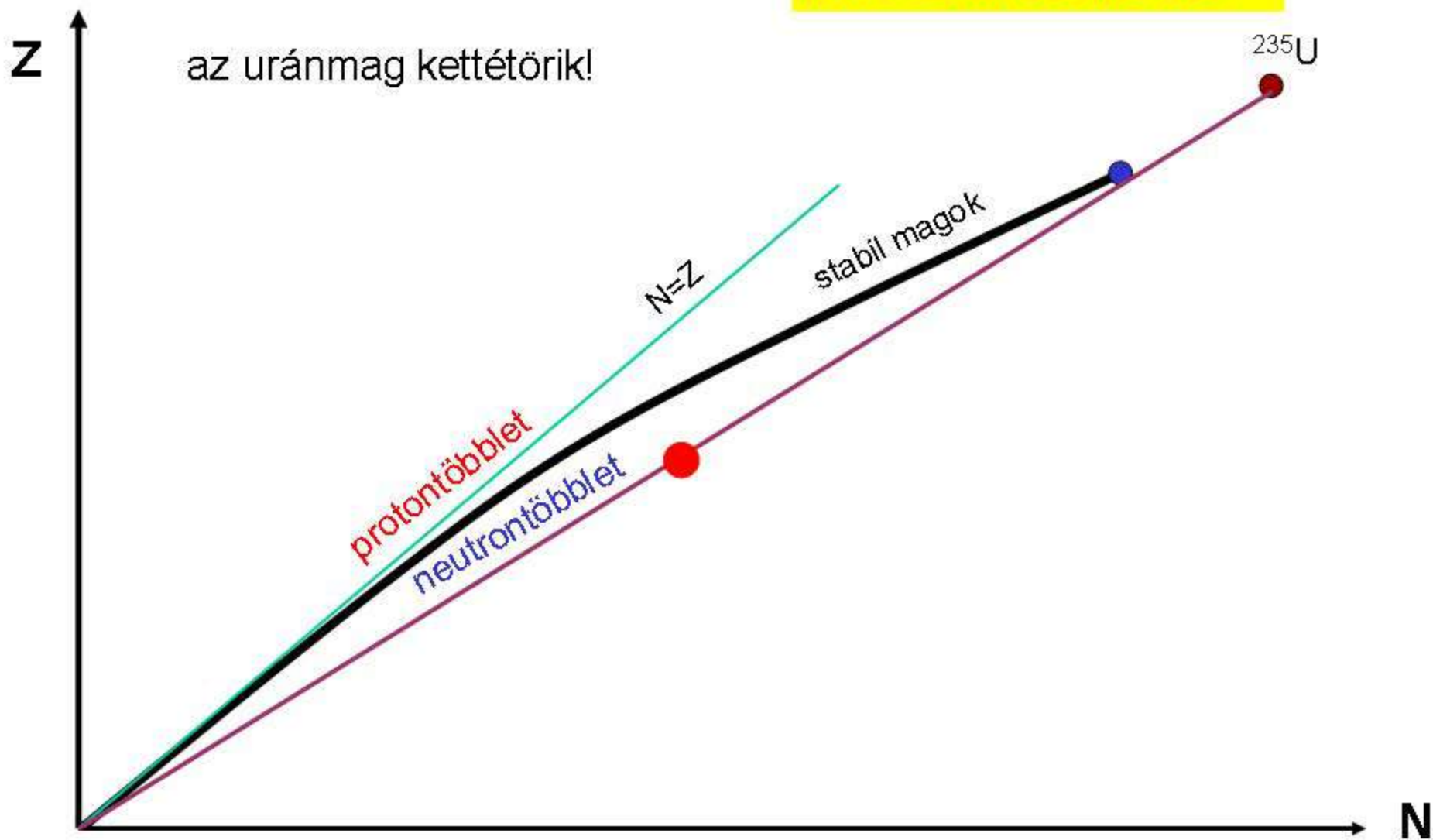
az uránmag kettétörik!



# Drasztikus magátalakulás:

# MAGHASADÁS

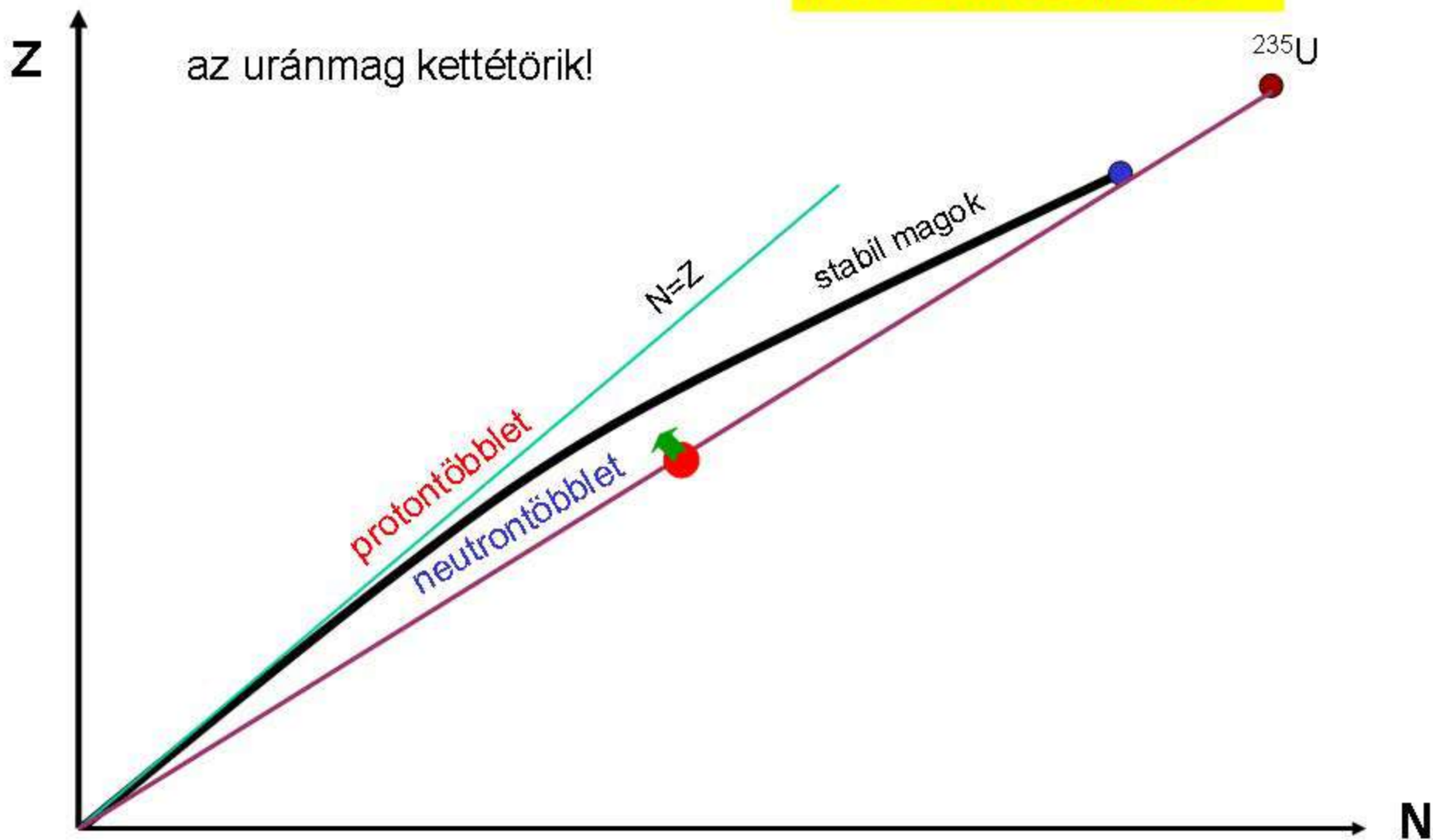
az uránmag kettétörik!



# Drasztikus magátalakulás:

# MAGHASADÁS

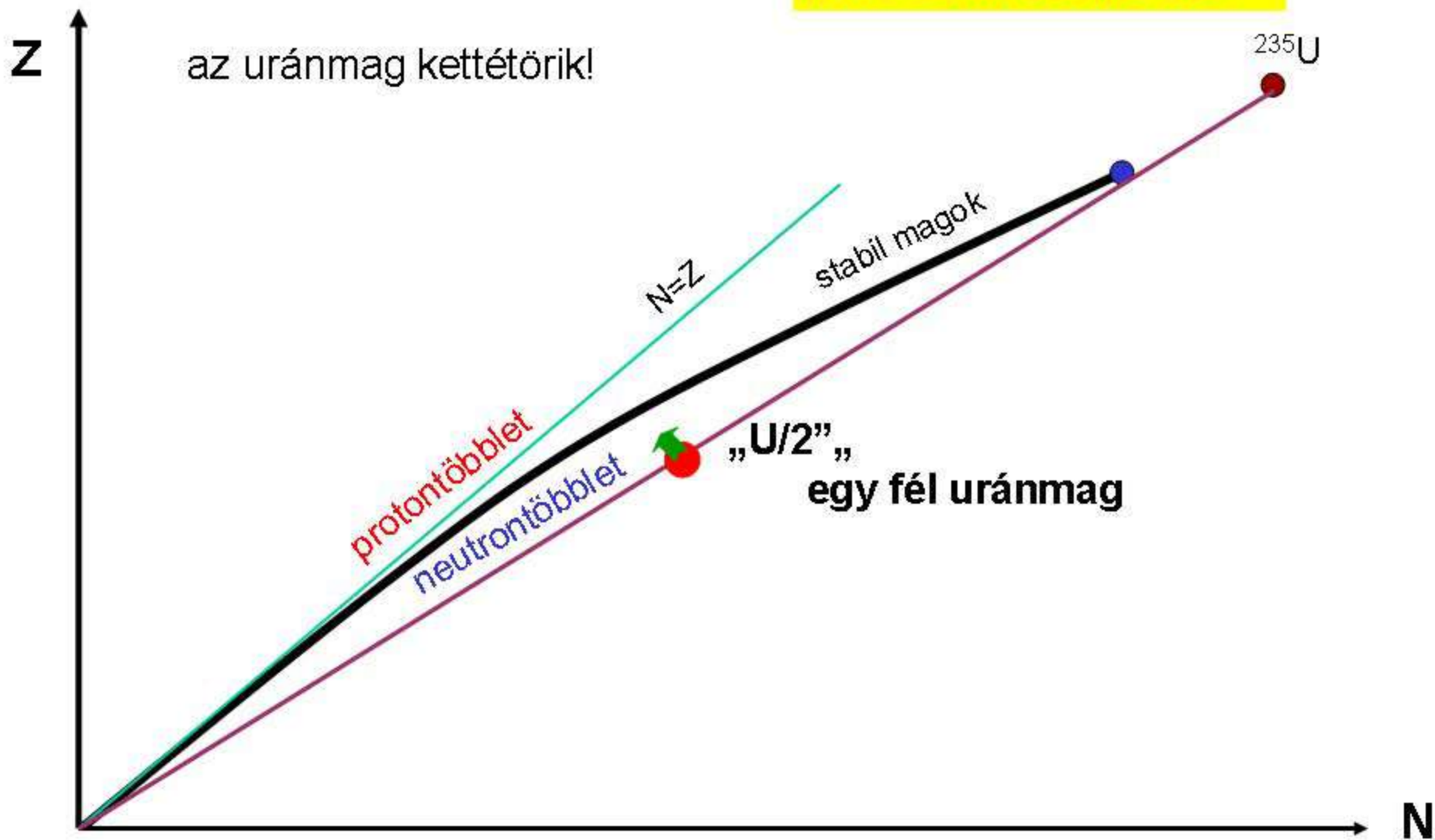
az uránmag kettétörlik!



# Drasztikus magátalakulás:

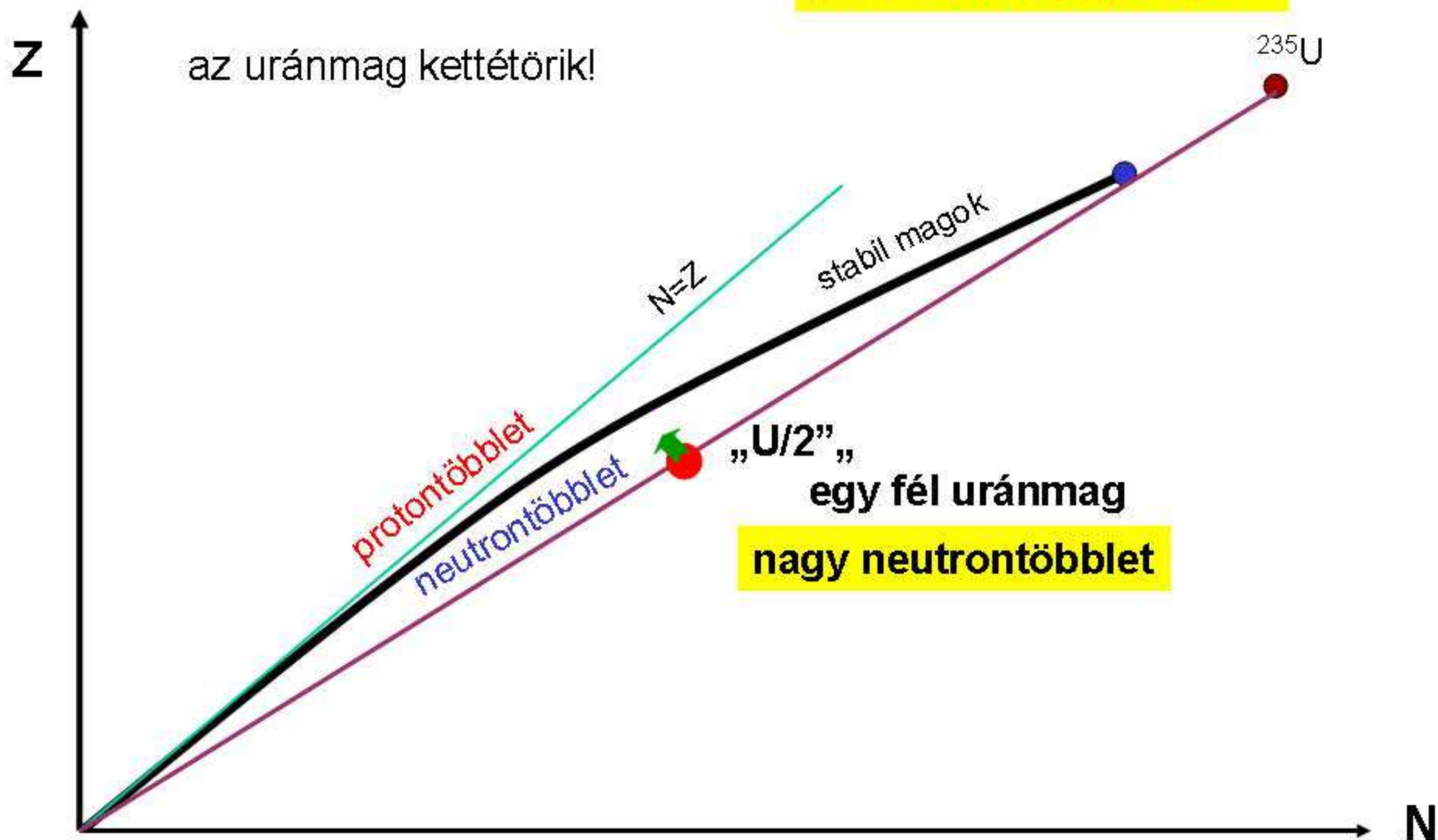
# MAGHASADÁS

az uránmag kettétörik!



# Drasztikus magátalakulás: **MAGHASADÁS**

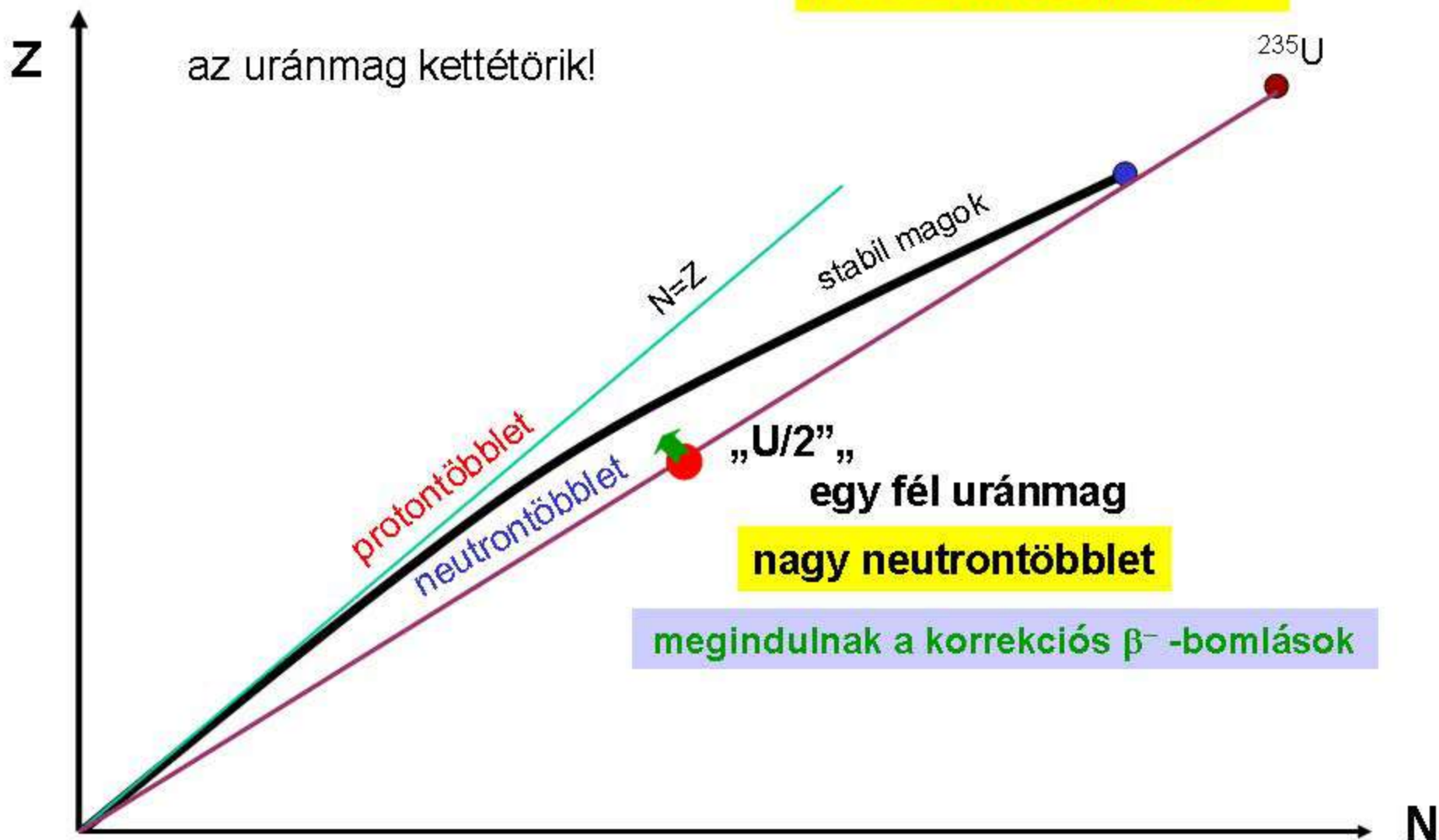
az uránmag kettétörik!





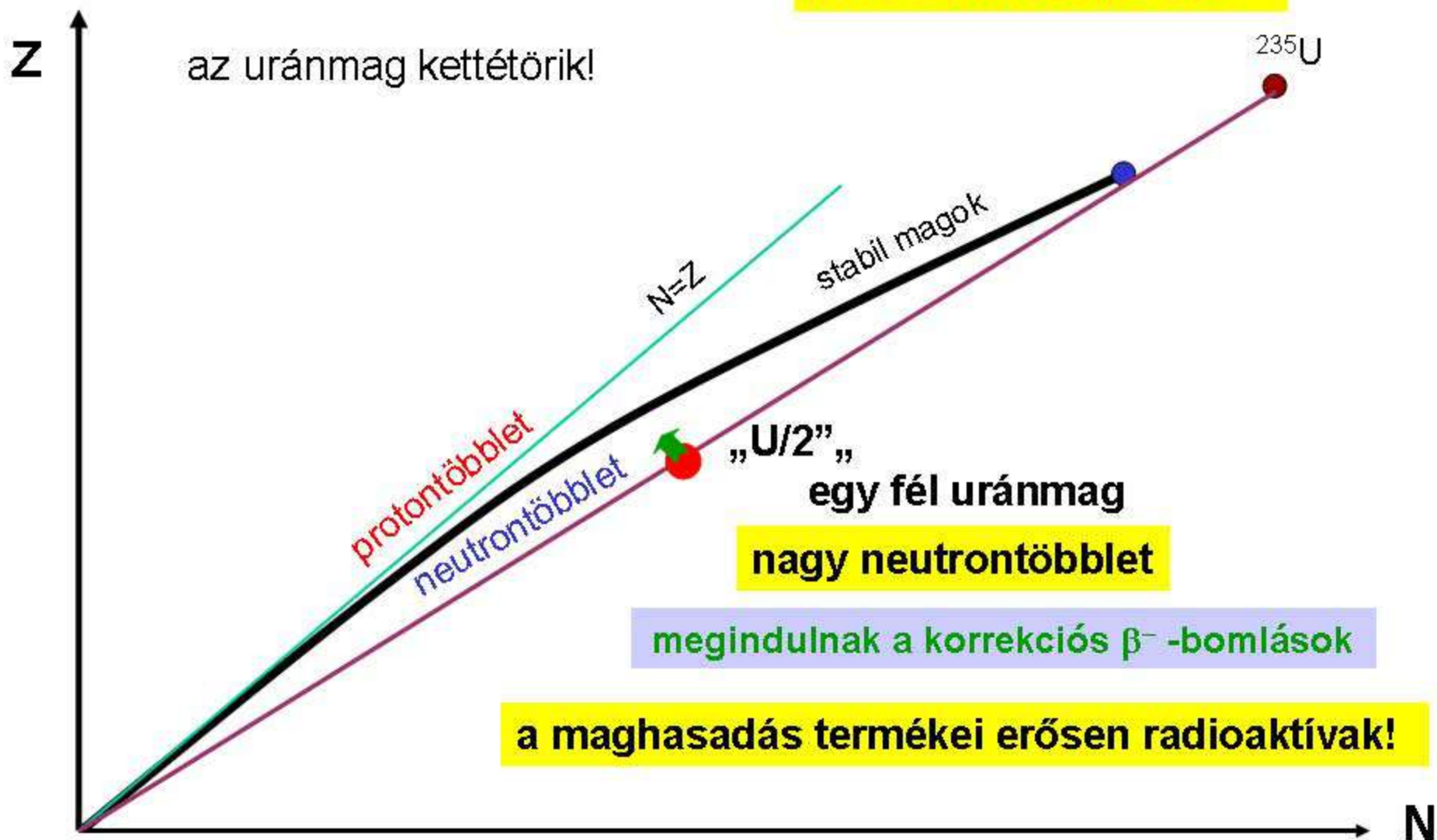
# Drasztikus magátalakulás: **MAGHASADÁS**

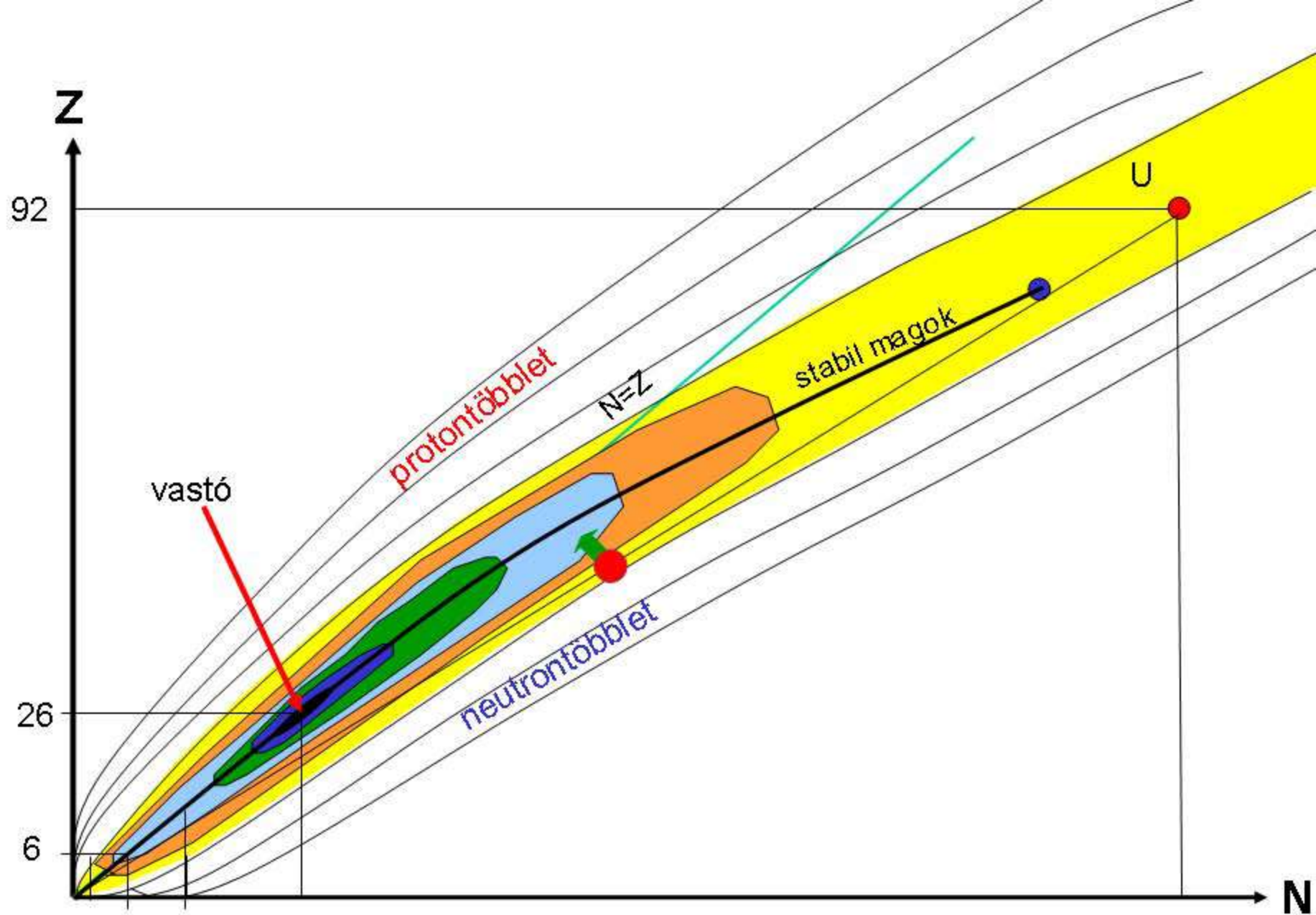
az uránmag kettétörlik!

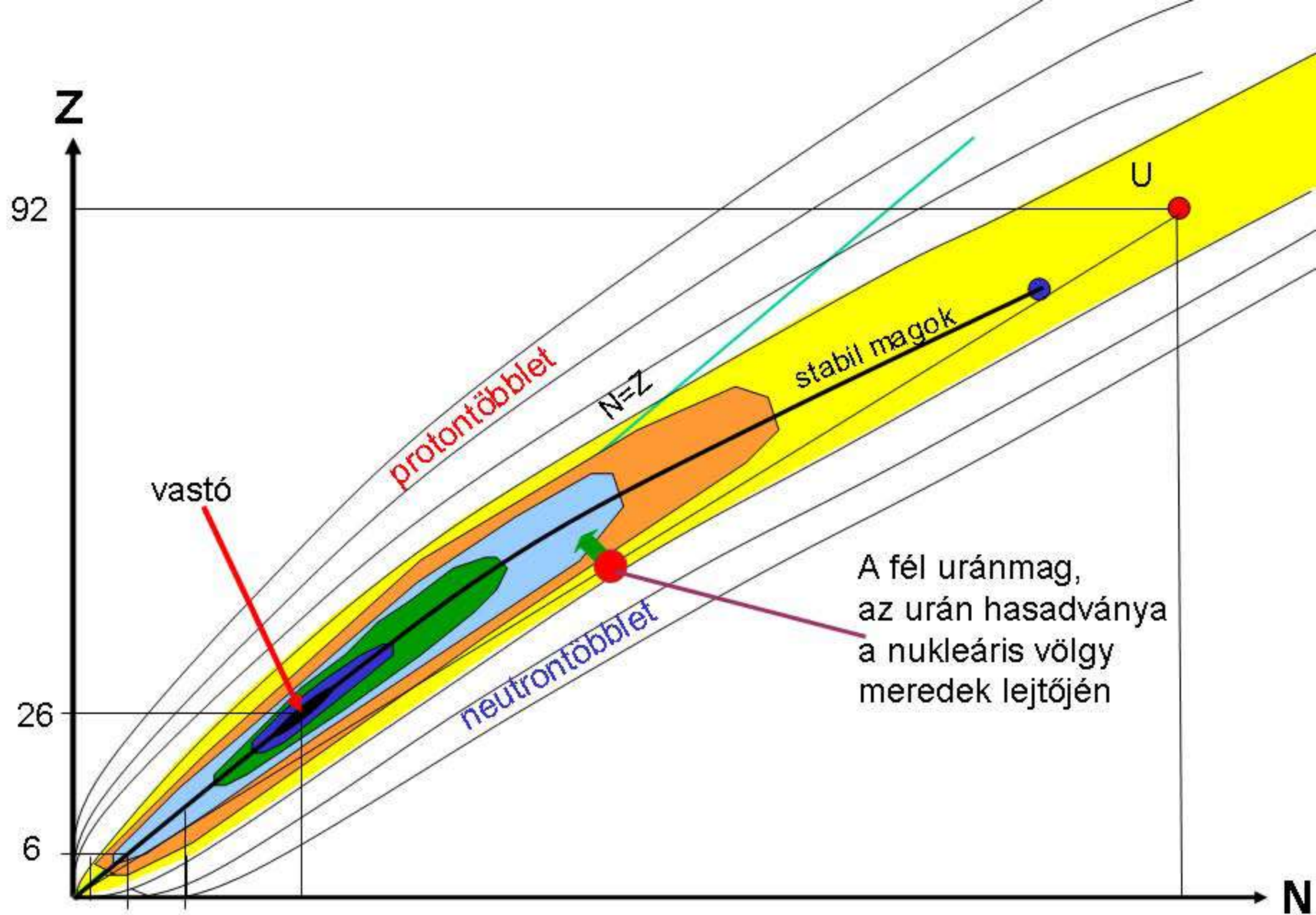


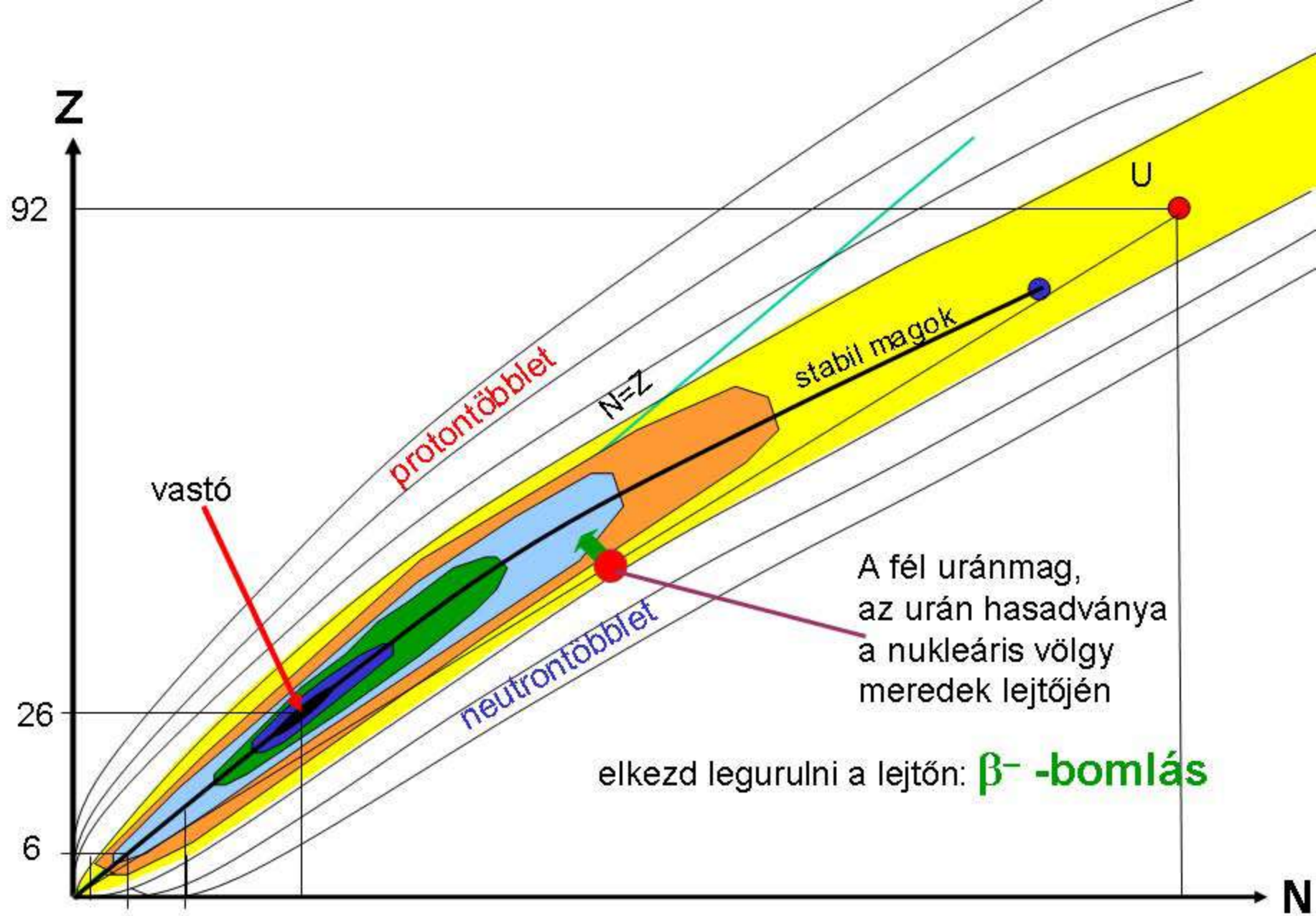
# Drasztikus magátalakulás: **MAGHASADÁS**

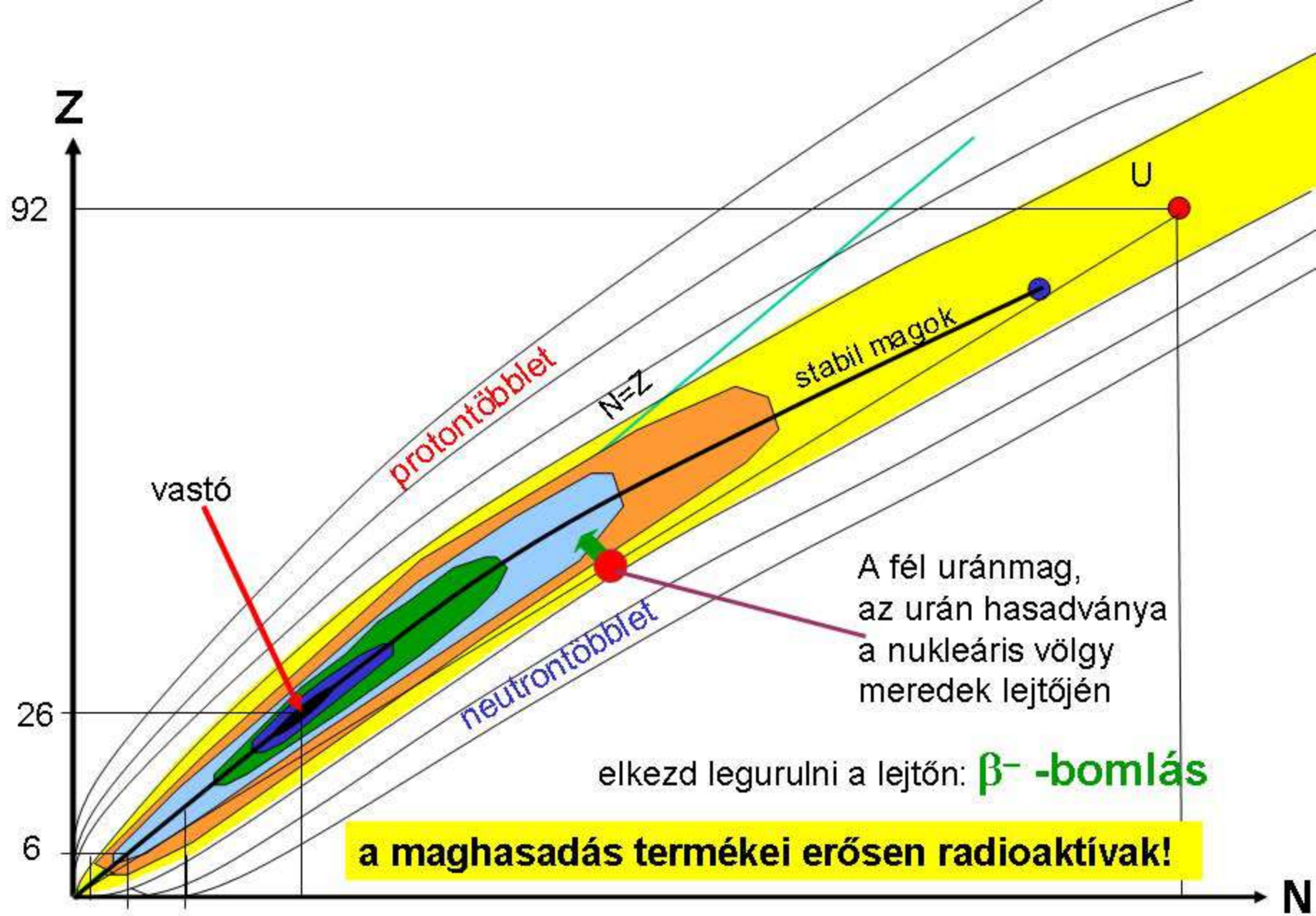
az uránmag kettétörik!







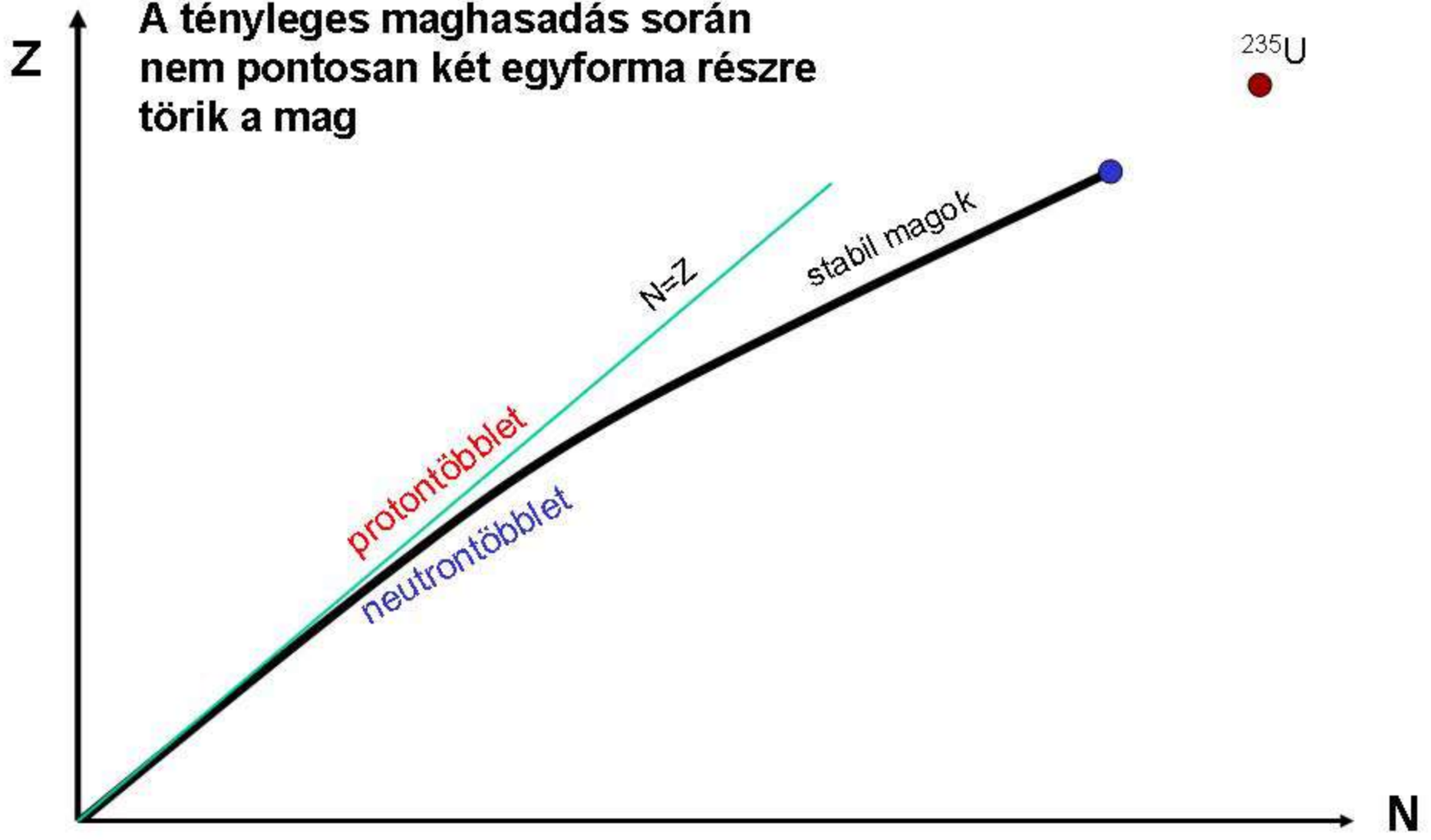




**A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag**



A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag

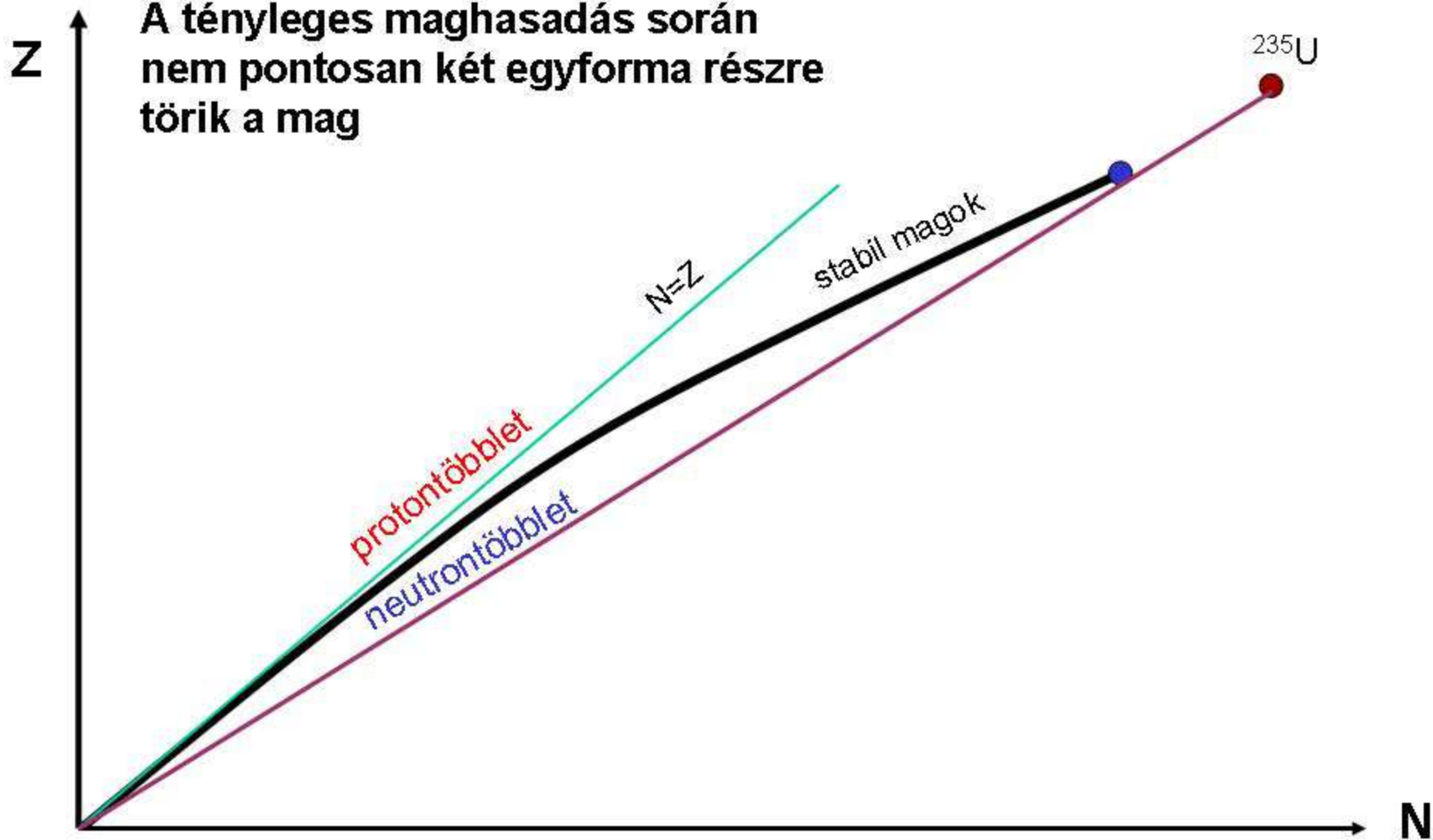


$^{235}\text{U}$

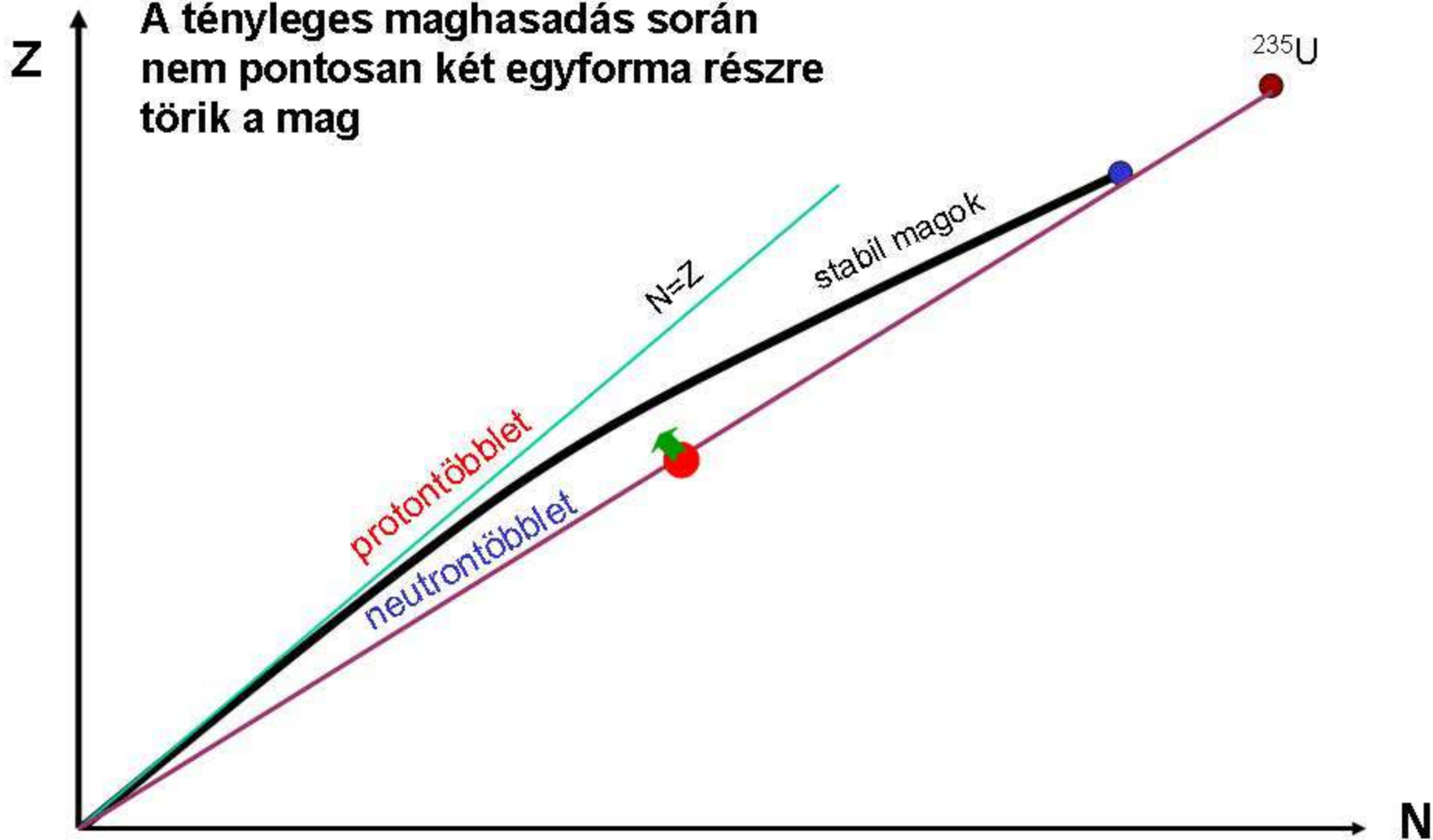




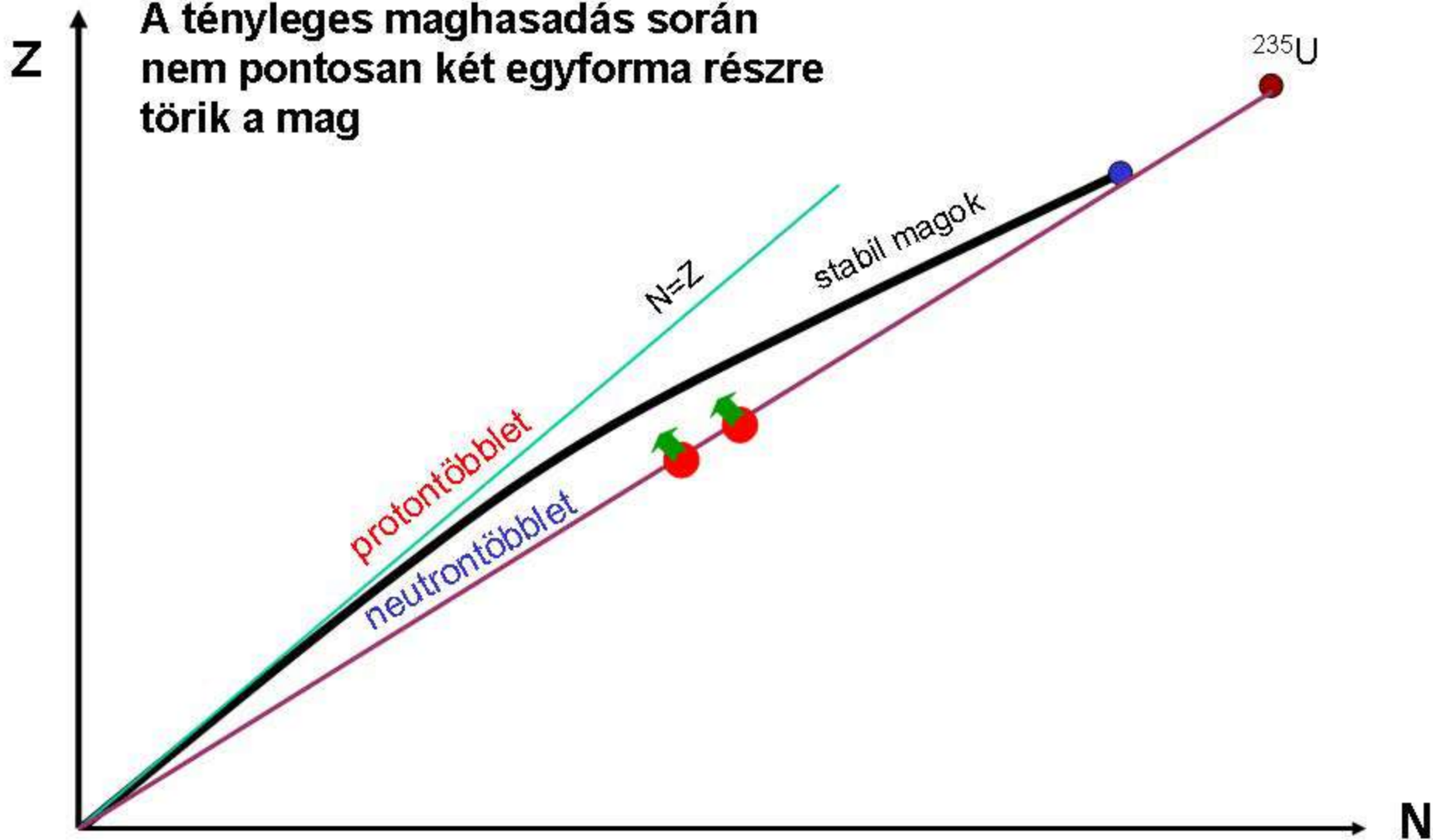
A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag



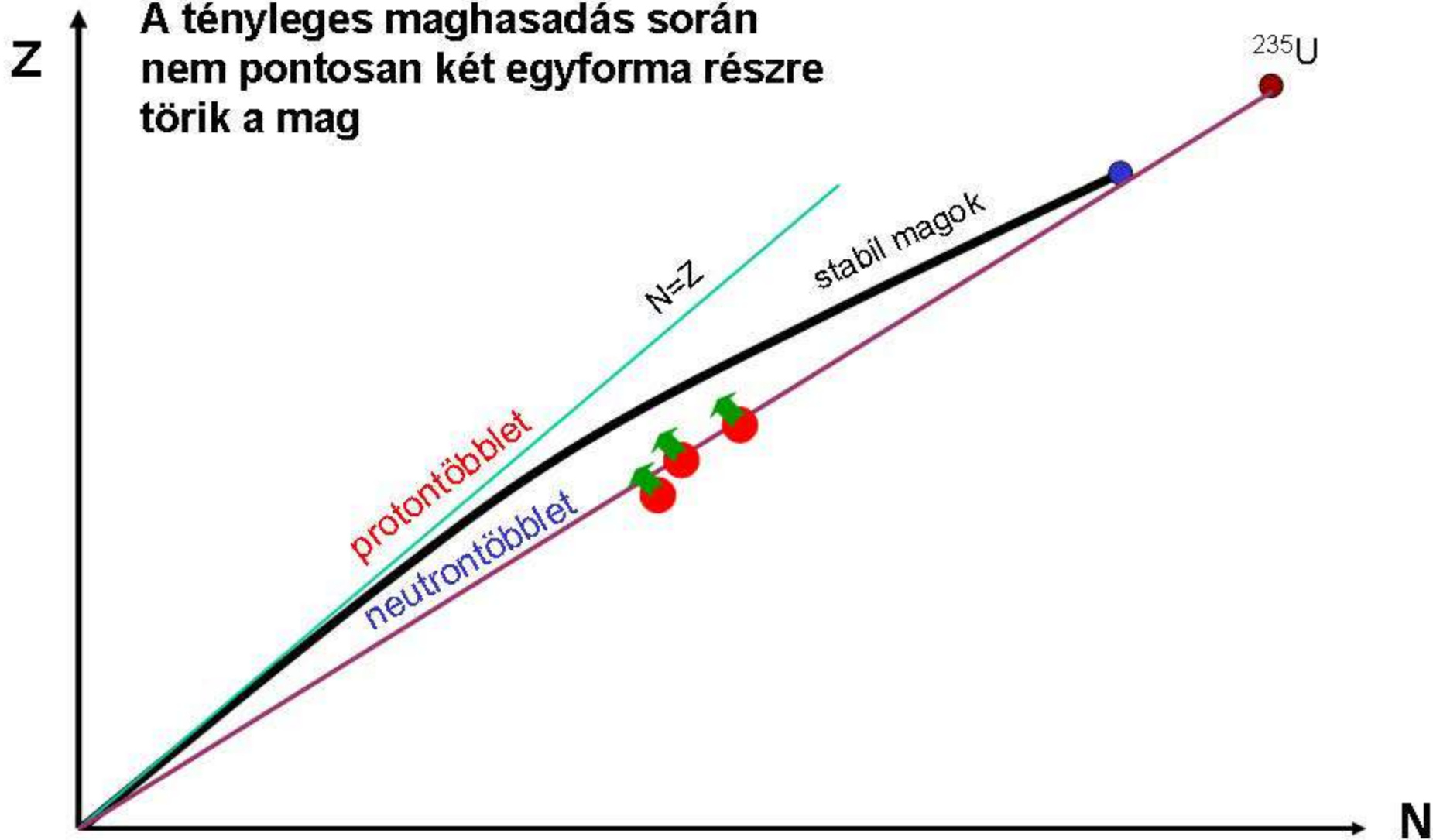
A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag



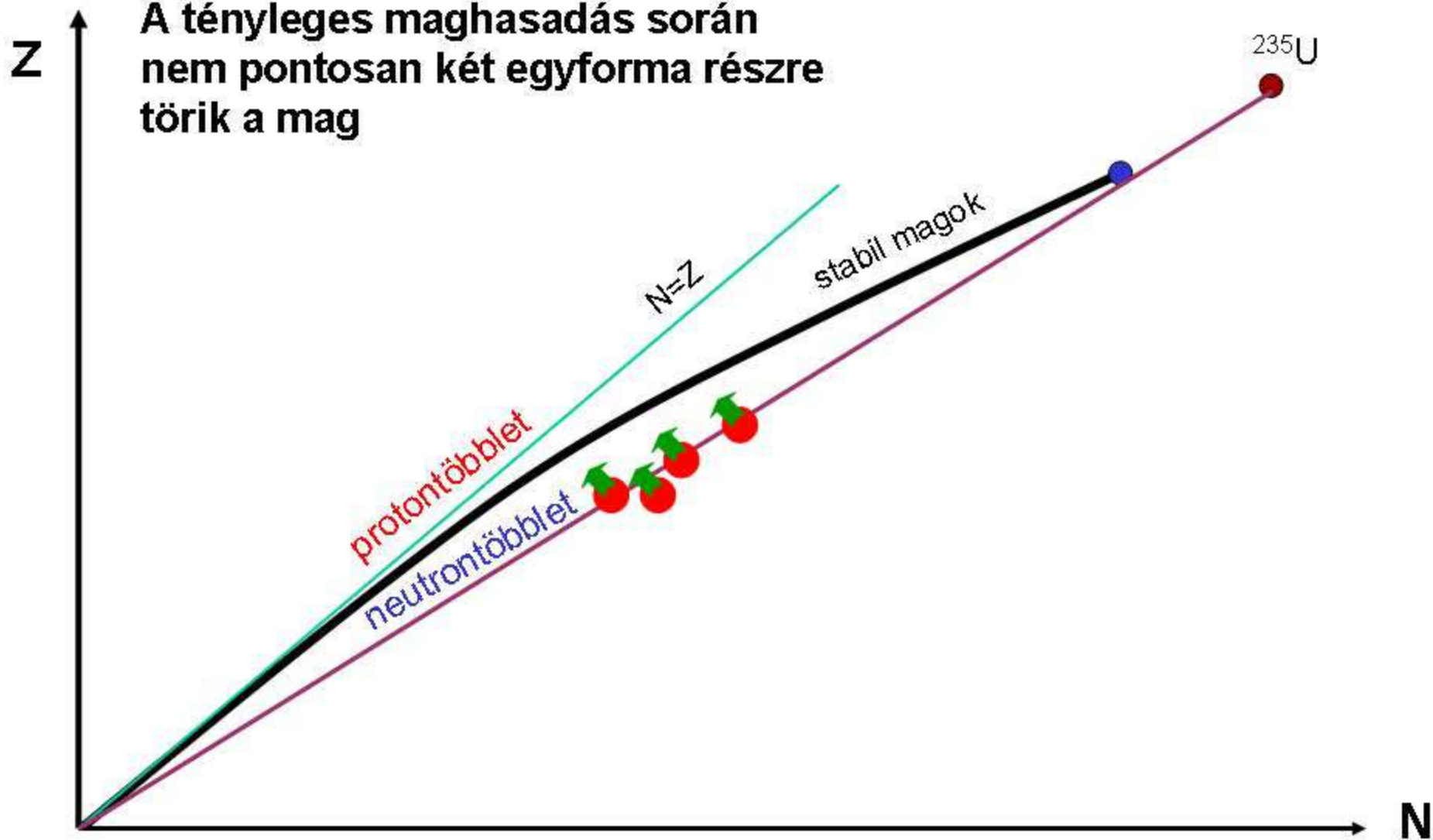
A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag



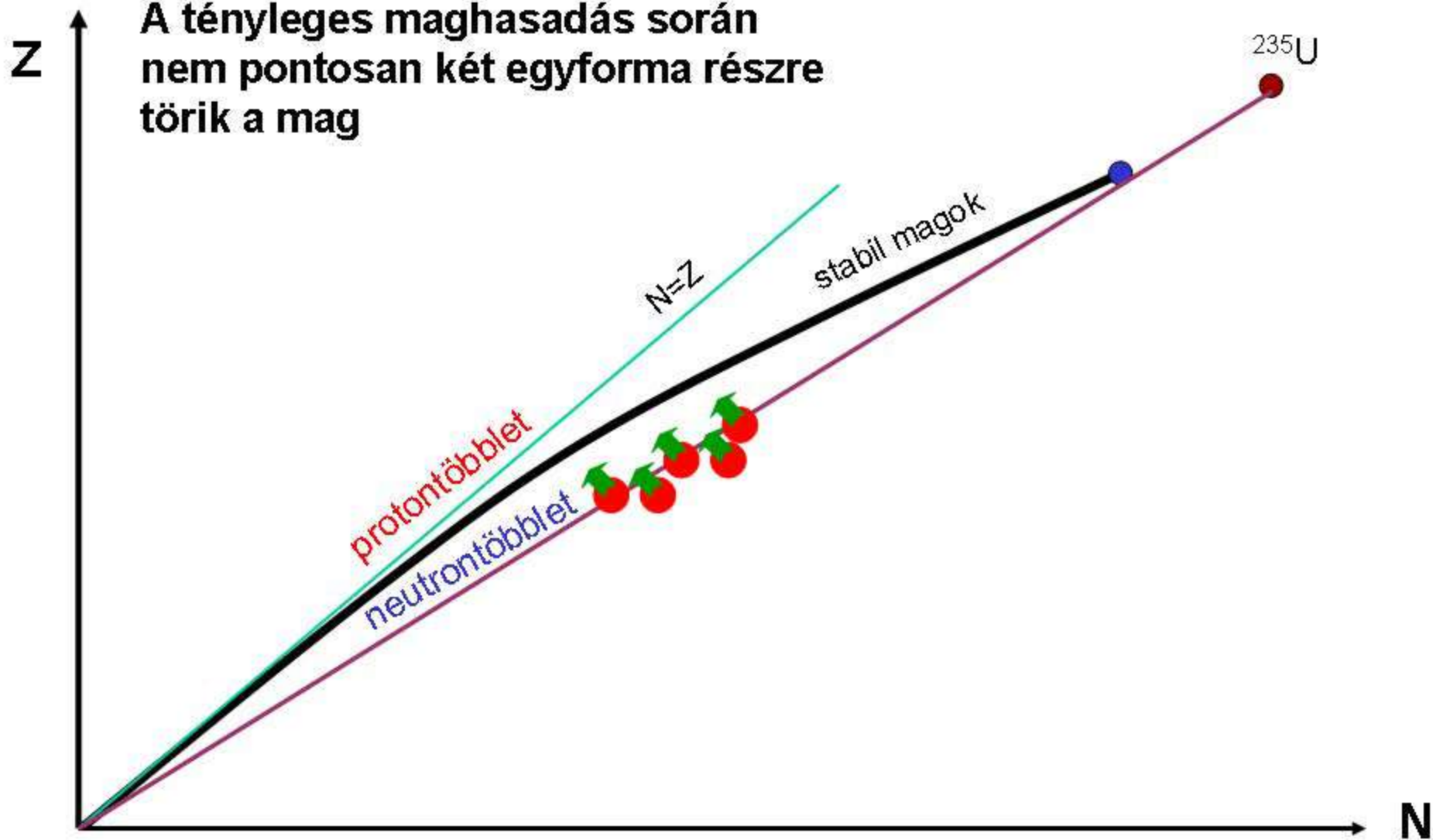
A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag



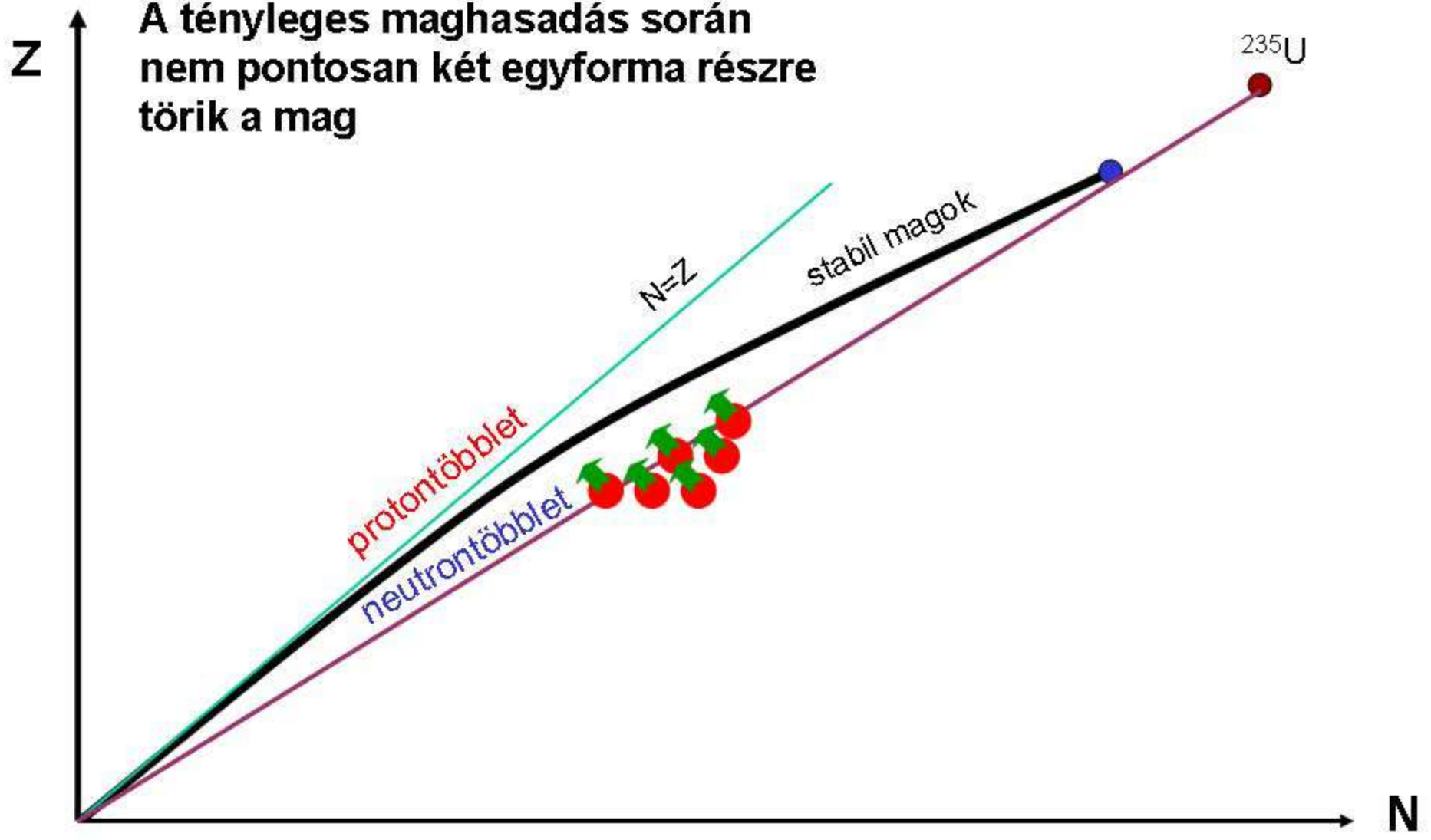
A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag

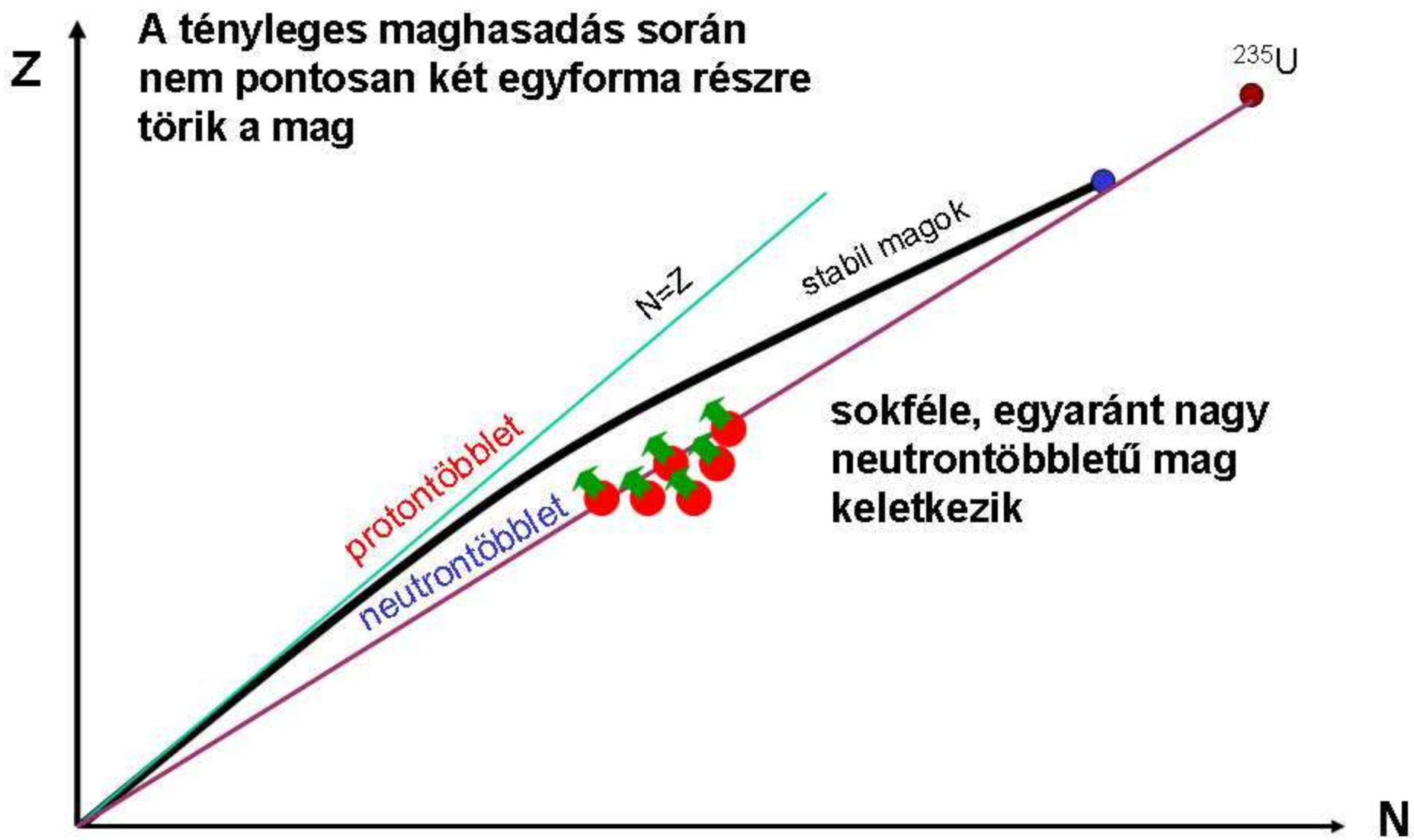


A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag

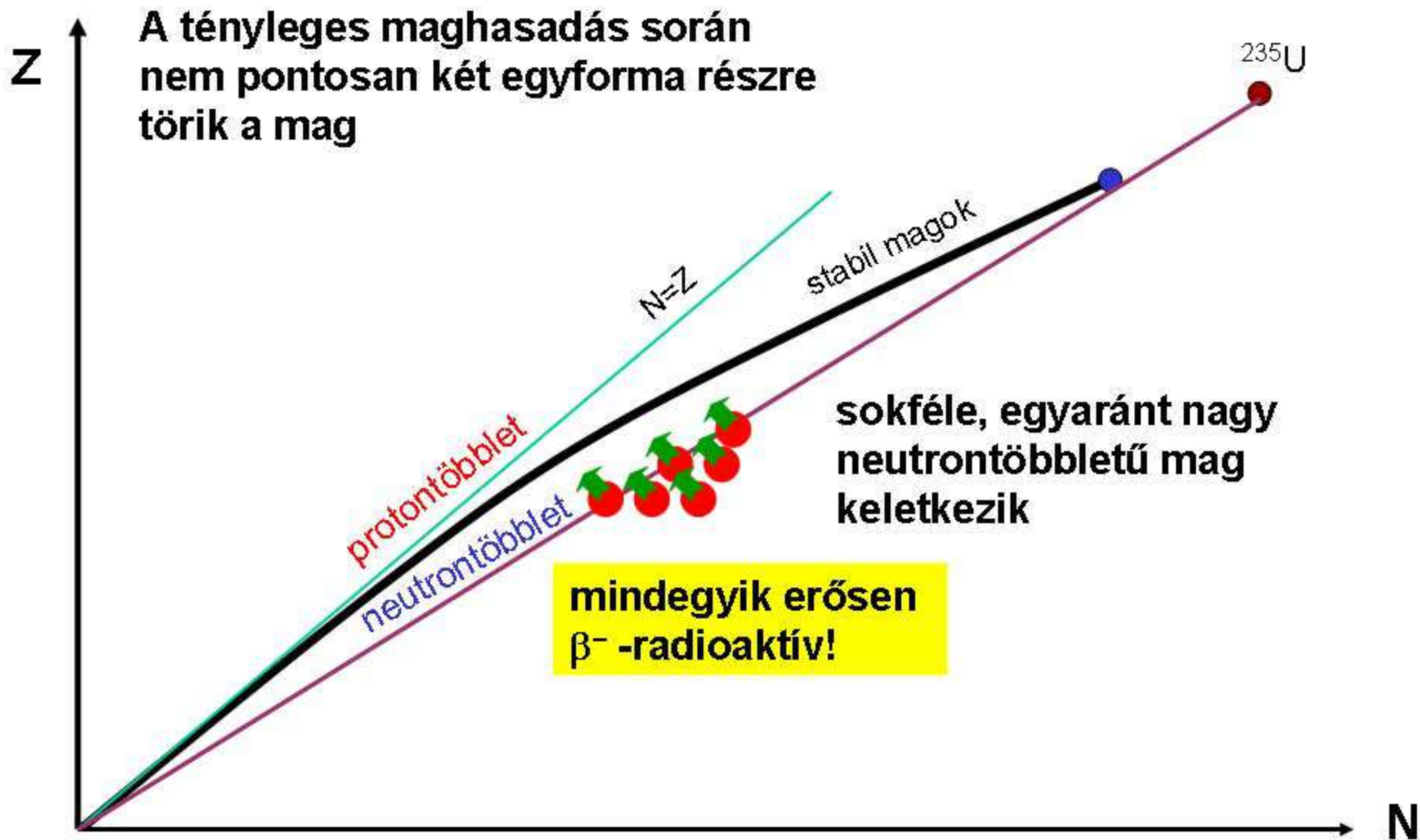


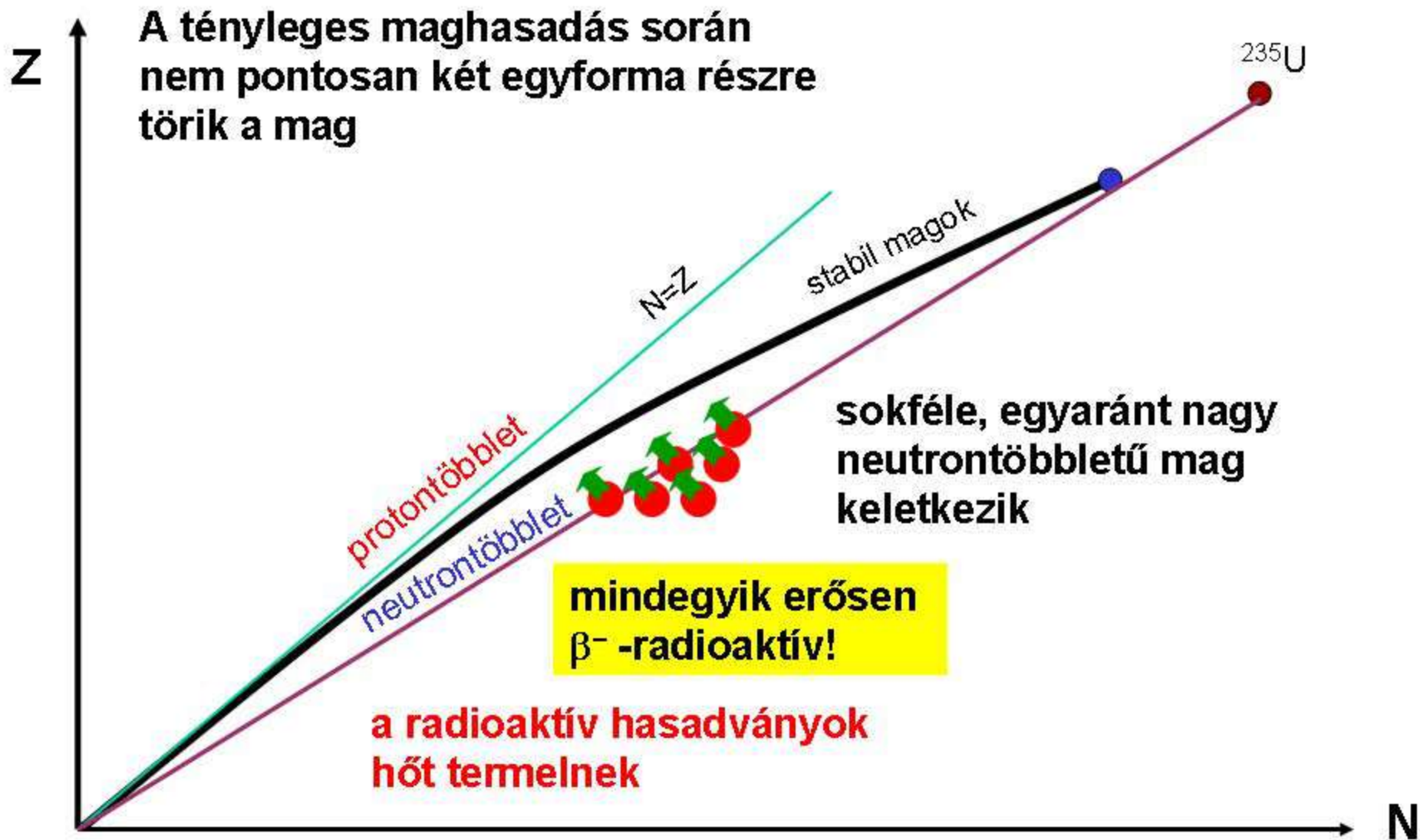
A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag











Z

A tényleges maghasadás során  
nem pontosan két egyforma részre  
törik a mag

<sup>235</sup>U

N=Z

stabil magok

protontöbblet  
neutrontöbblet

sokféle, egyaránt nagy  
neutrontöbbletű mag  
keletkezik

mindegyik erősen  
 $\beta^-$ -radioaktív!

plusz  
kiszabadul  
2–3 szabad  
neutron is !

a radioaktív hasadványok  
hőt termelnek

N



# Radioaktív hőtermelés



# Radioaktív hőtermelés

Lefelé a nukleáris völgy lejtőjén: energia szabadul fel!



## Radioaktív hőtermelés

Lefelé a nukleáris völgy lejtőjén: energia szabadul fel!

Milyen formában?



## Radioaktív hőtermelés

Lefelé a nukleáris völgy lejtőjén: energia szabadul fel!

Milyen formában?

A kirepülő részecskék  
(alfa-részek, elektronok, hasadt magok)  
**mozgási energiája** formájában



## Radioaktív hőtermelés

Lefelé a nukleáris völgy lejtőjén: energia szabadul fel!

Milyen formában?

A kirepülő részecskék  
(alfa-részek, elektronok, hasadt magok)  
**mozgási energiája** formájában

A gyorsan mozgó részecskék meglölik a környező atomokat  
– az energia eloszlik, a közeg **MELEGSZIK**.





## Radioaktív hőtermelés

Lefelé a nukleáris völgy lejtőjén: energia szabadul fel!

Milyen formában?

A kirepülő részecskék  
(alfa-részek, elektronok, hasadt magok)  
**mozgási energiája** formájában

A gyorsan mozgó részecskék meglölik a környező atomokat  
– az energia eloszlik, a közeg **MELEGSZIK**.

**A radioaktív hulladékok olykor  
évekig annyi hőt fejlesztenek, hogy  
hűtés nélkül megolvadnának!**

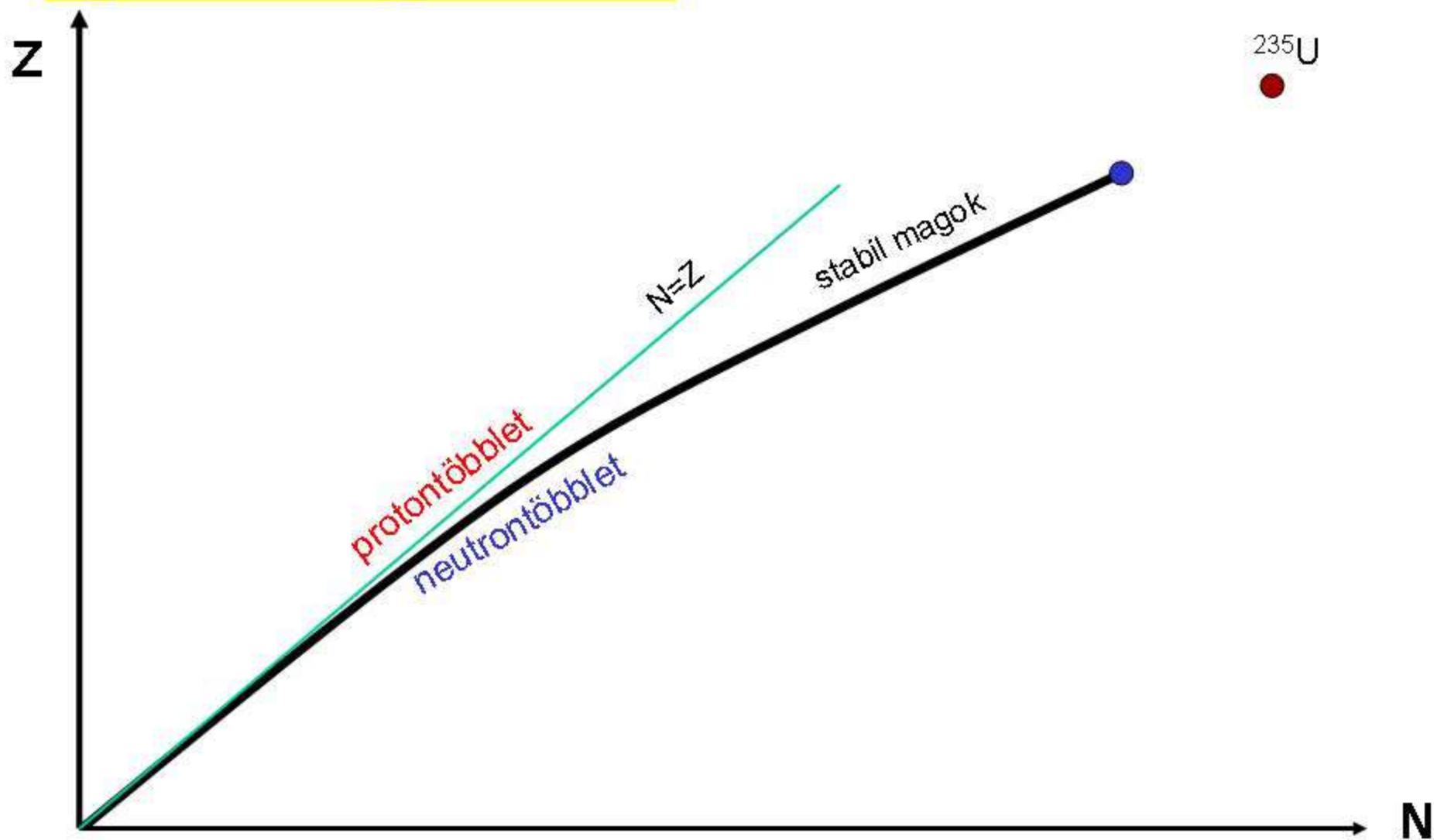


# Spontán maghasadás

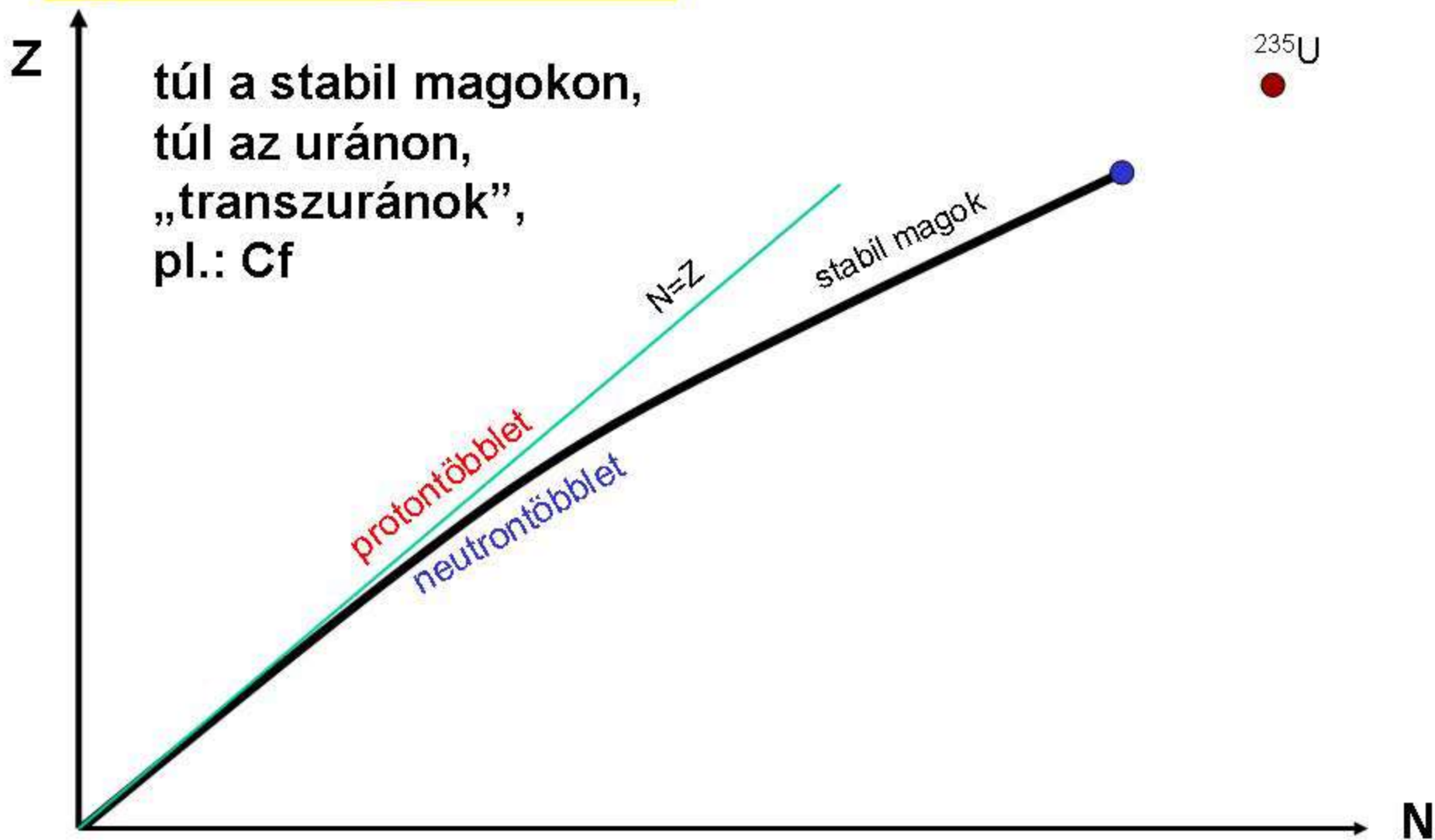
N



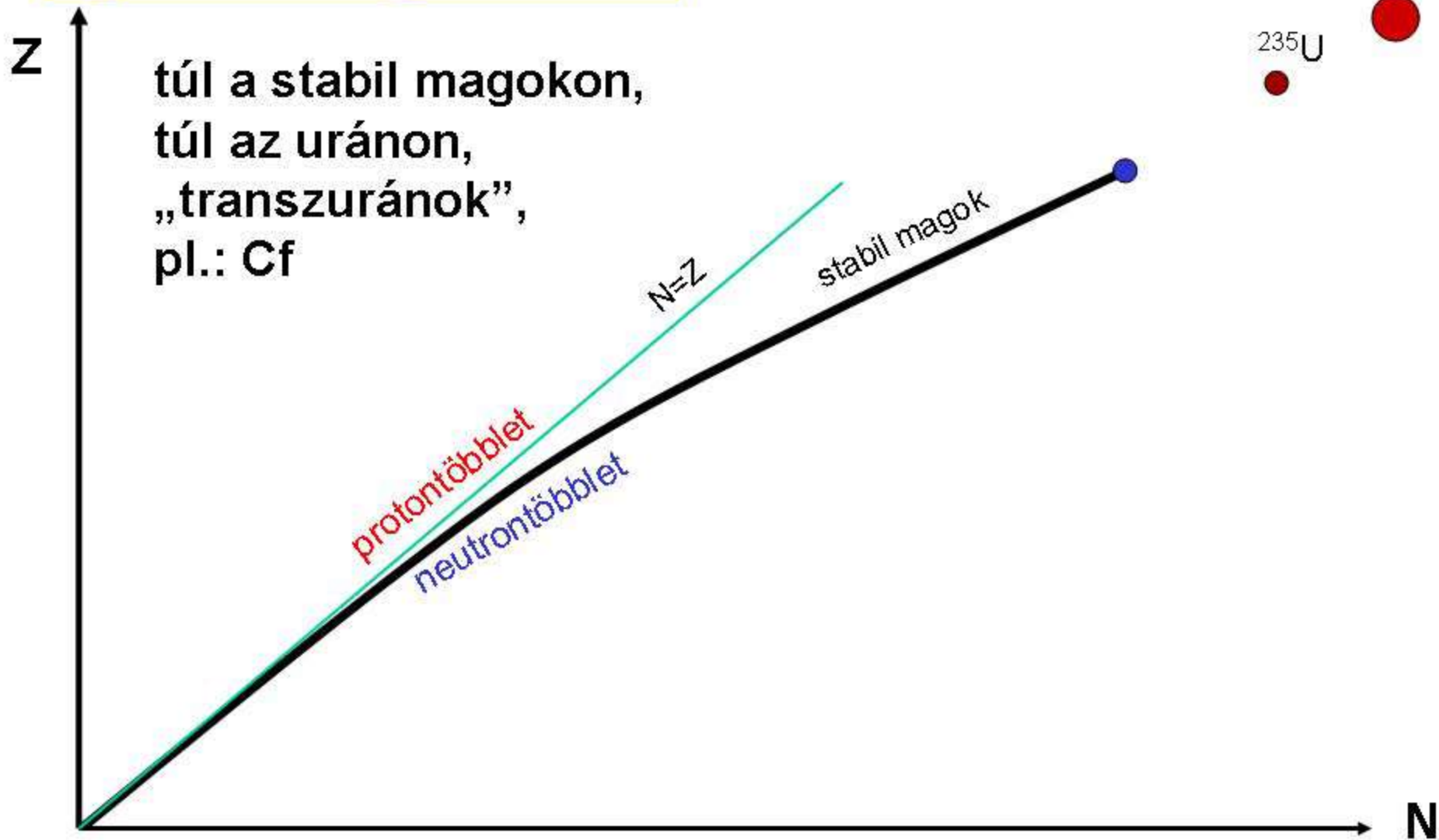
# Spontán maghasadás



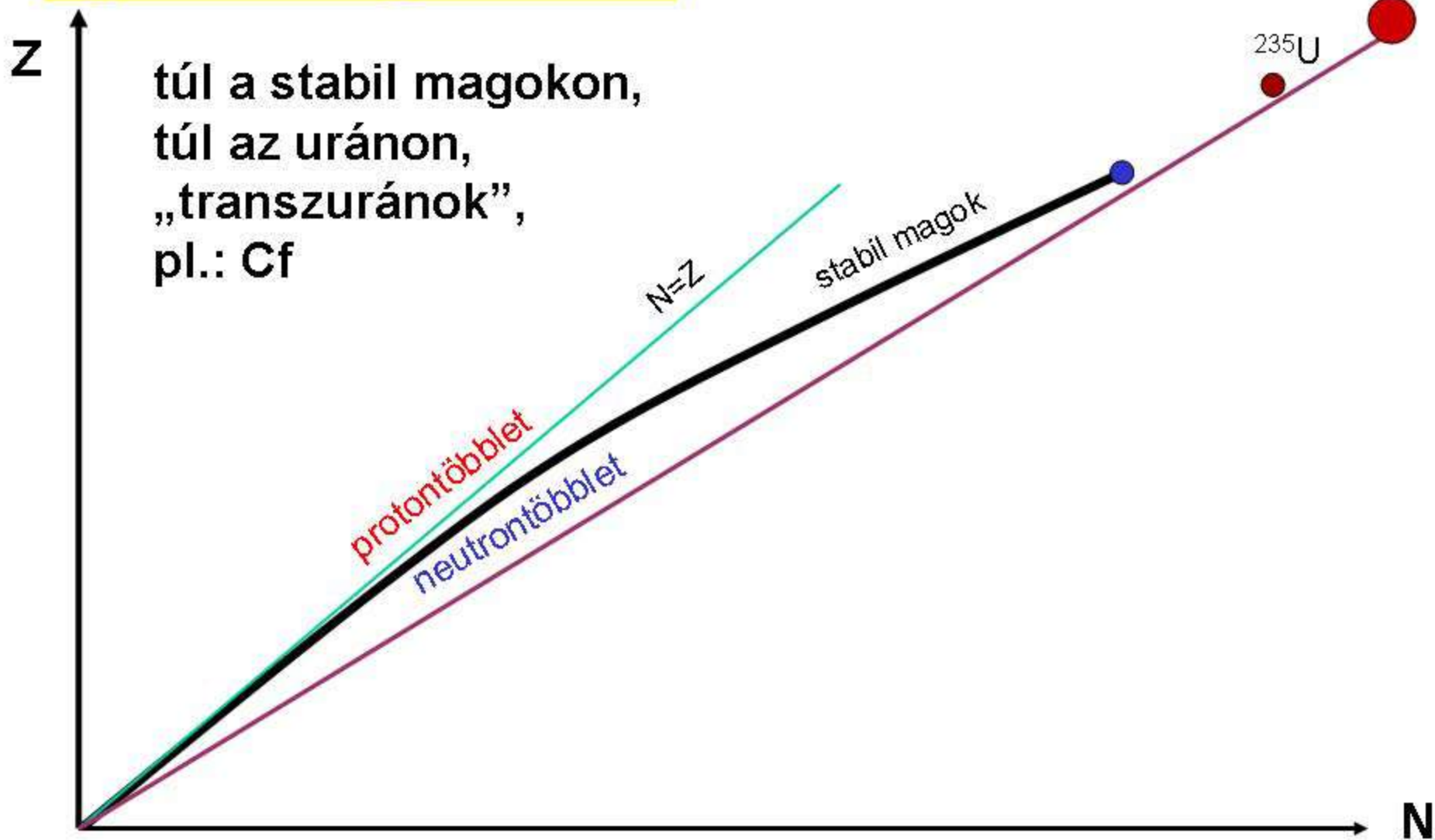
# Spontán maghasadás



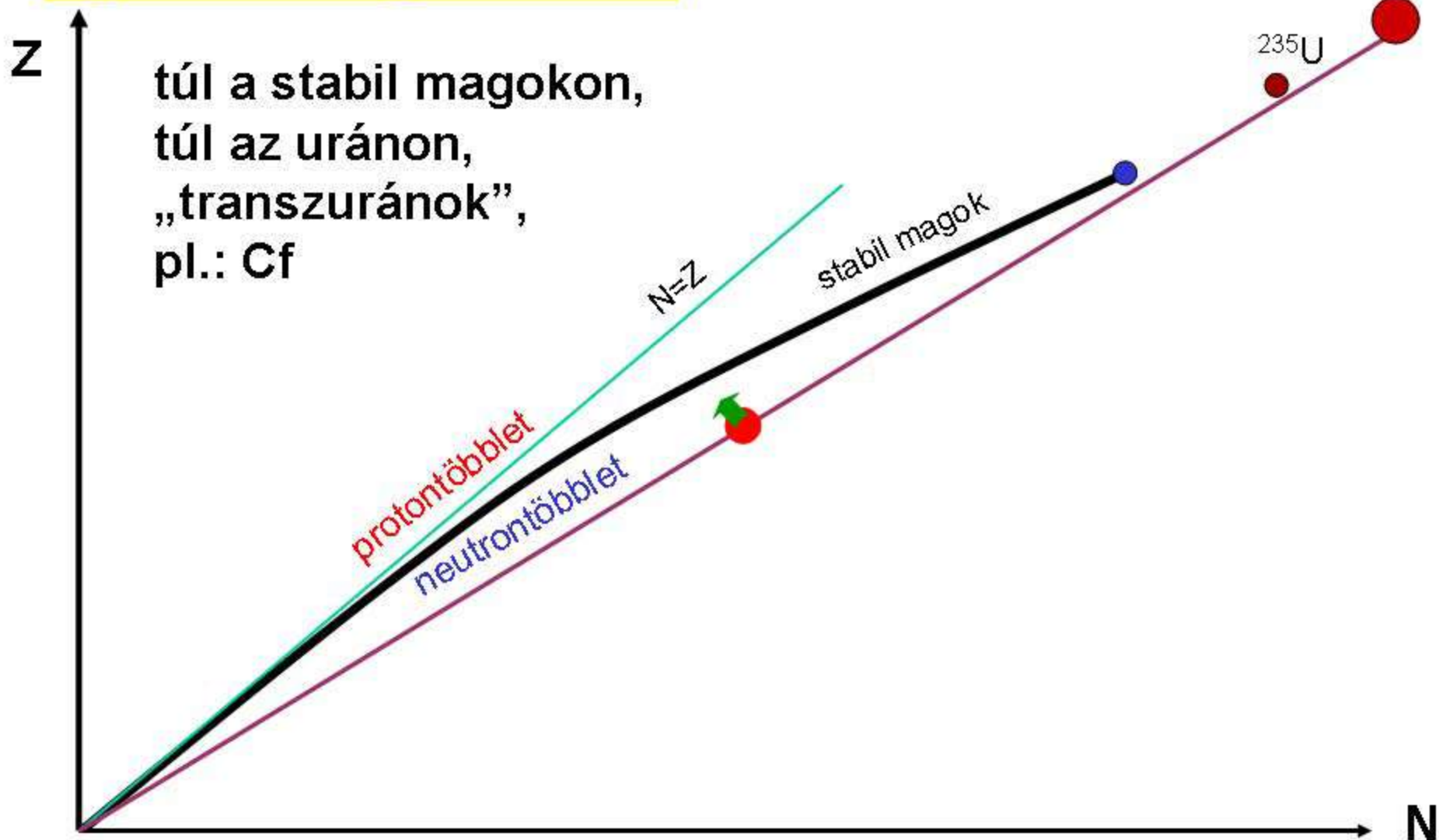
# Spontán maghasadás



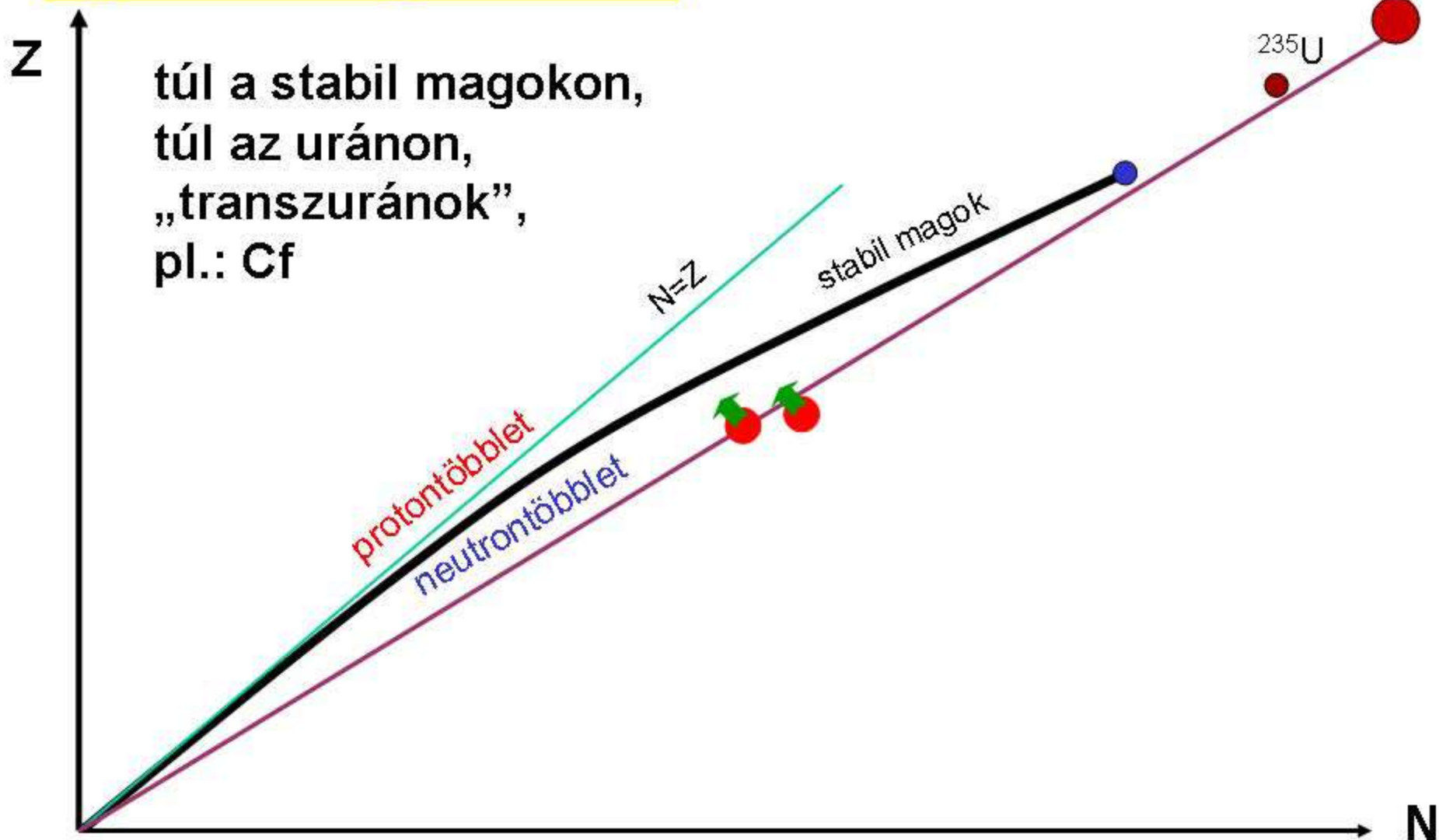
# Spontán maghasadás



# Spontán maghasadás

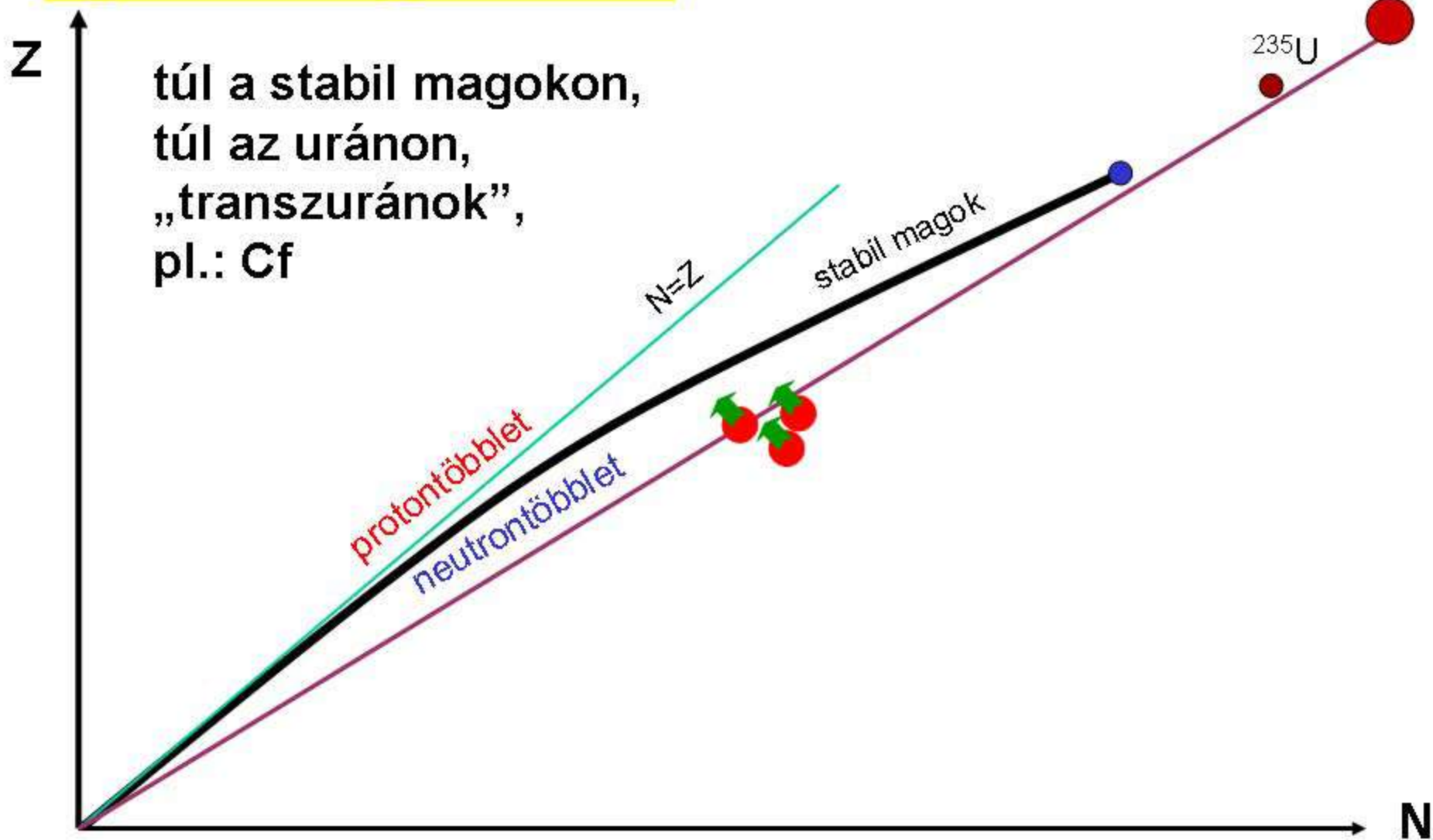


# Spontán maghasadás

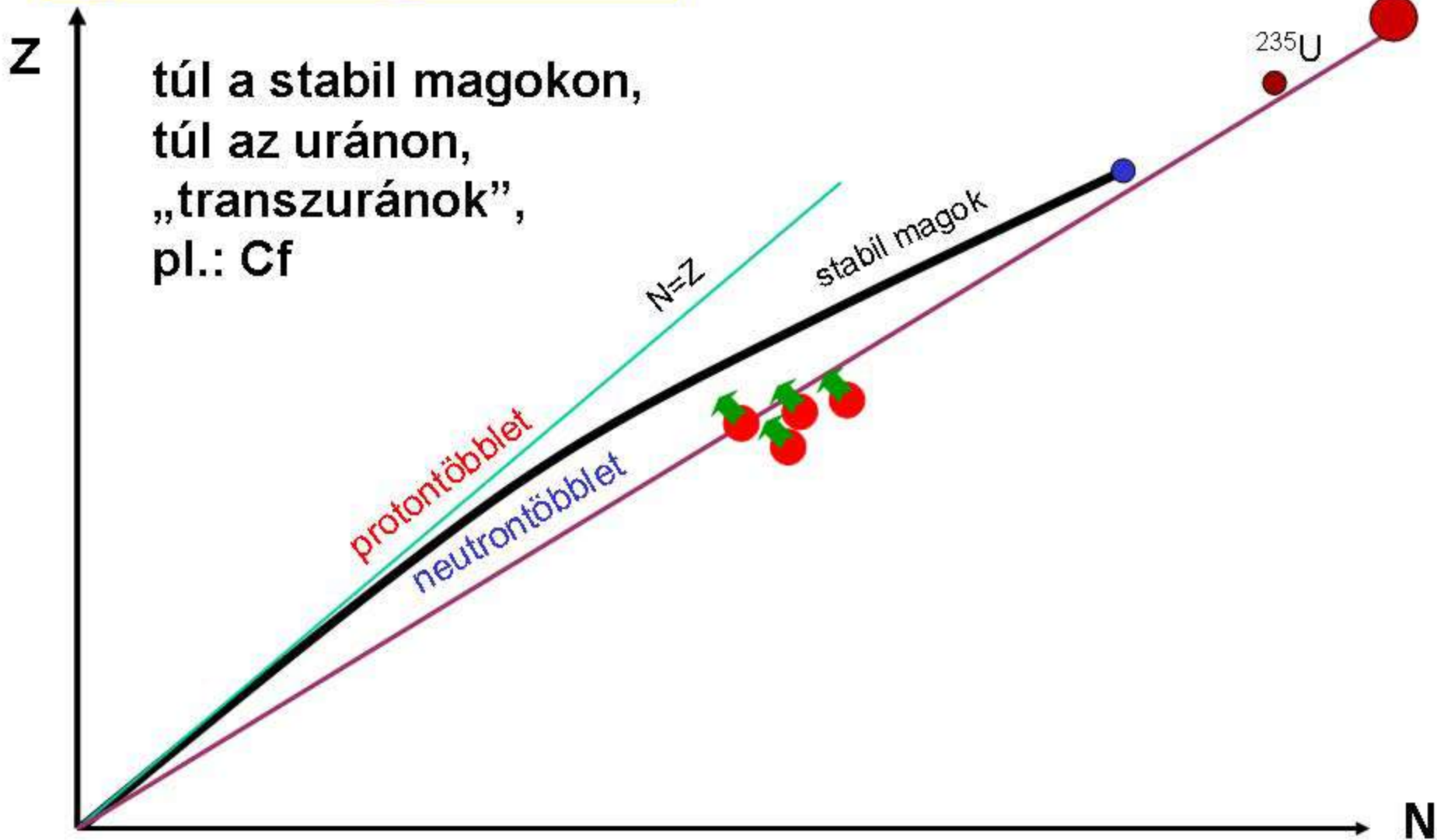




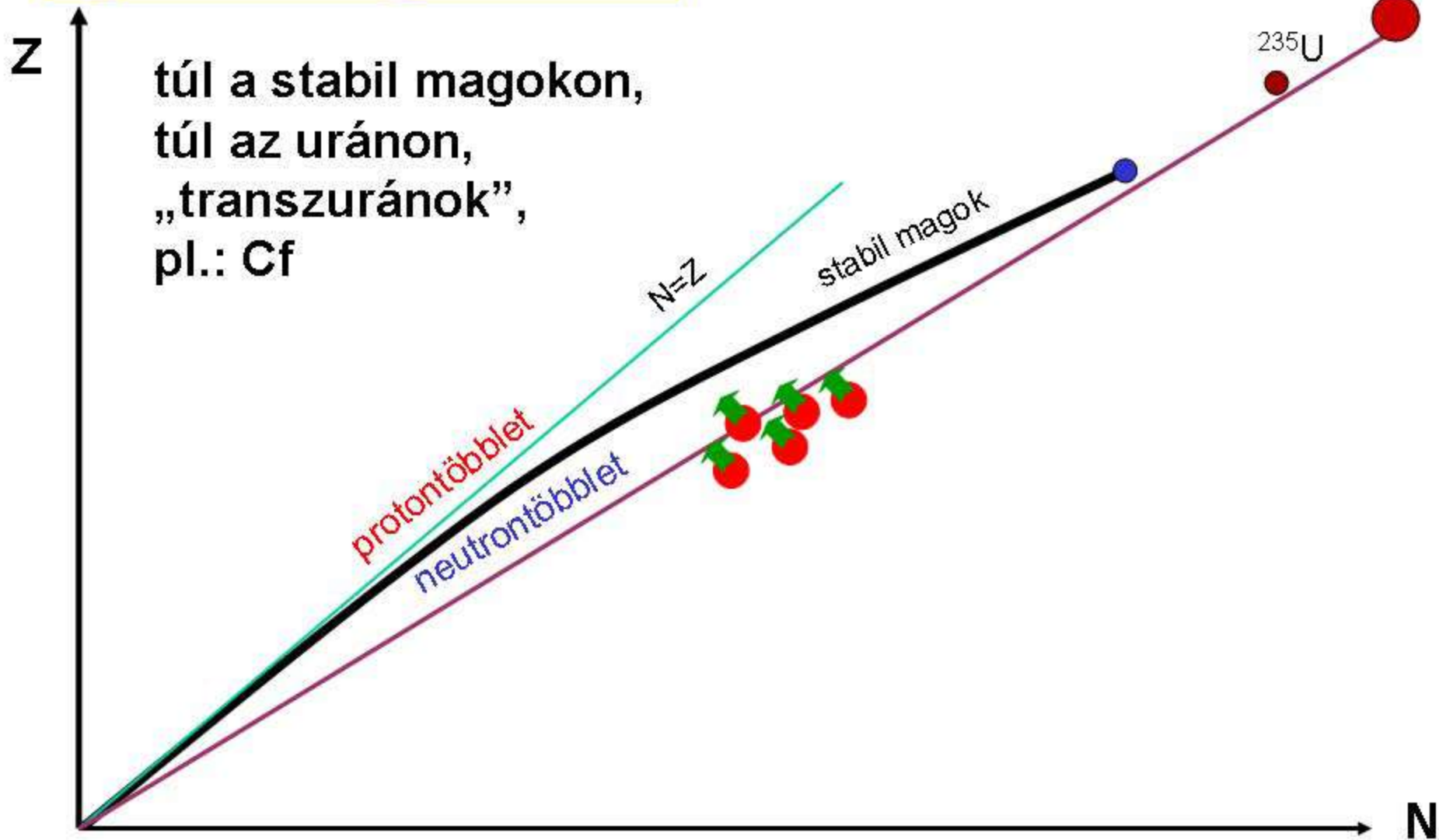
# Spontán maghasadás



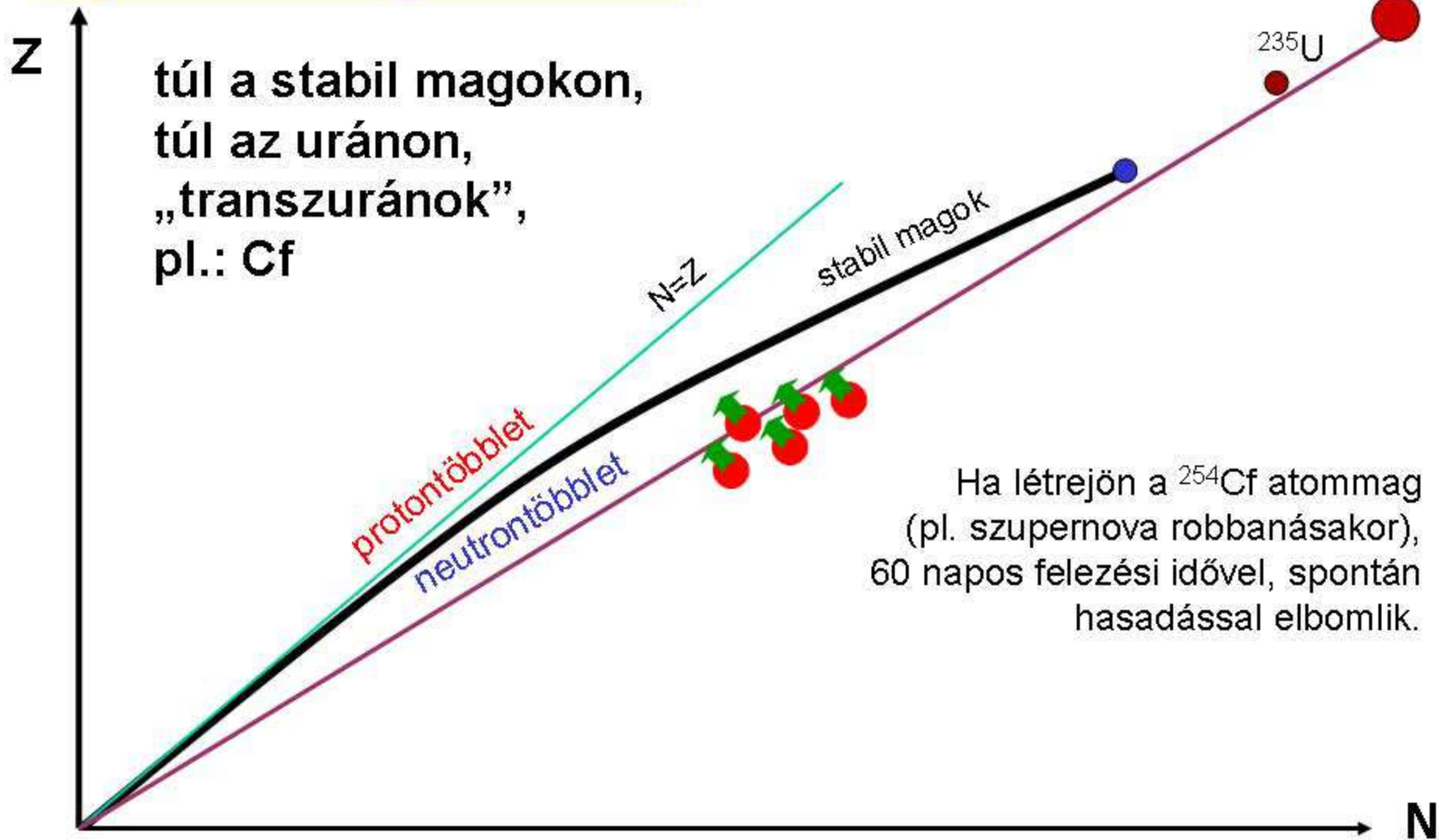
# Spontán maghasadás



# Spontán maghasadás



# Spontán maghasadás



túl a stabil magokon,  
túl az uránon,  
„transzuránok”,  
pl.: Cf

Ha létrejön a  $^{254}\text{Cf}$  atommag  
(pl. szupernova robbanásakor),  
60 napos felezési idővel, spontán  
hasadással elbomlik.



# Indukált (nem spontán) maghasadás



## Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).



## Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)



## Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:



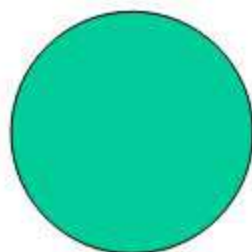


# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:



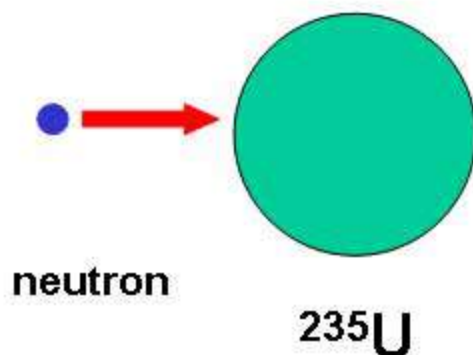
$^{235}\text{U}$

# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:

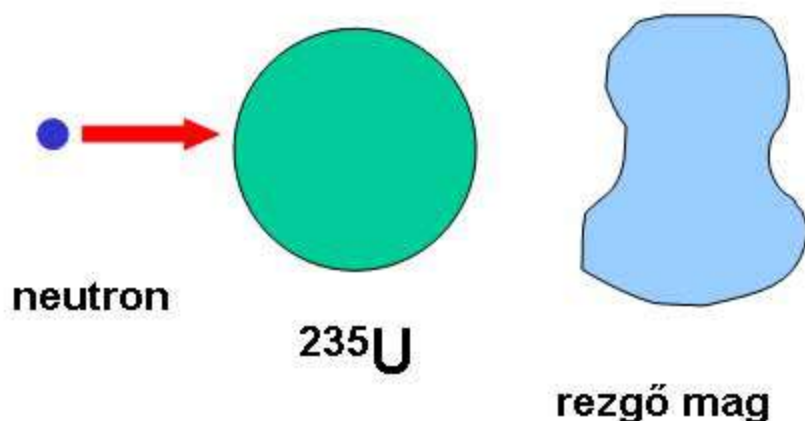


# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:

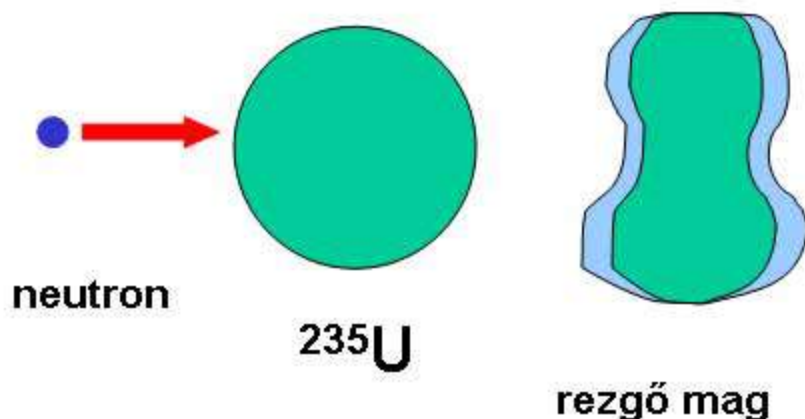


# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:

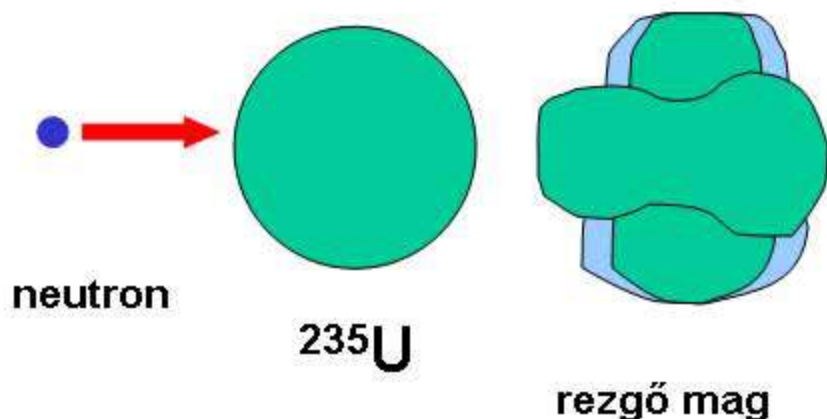


# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:

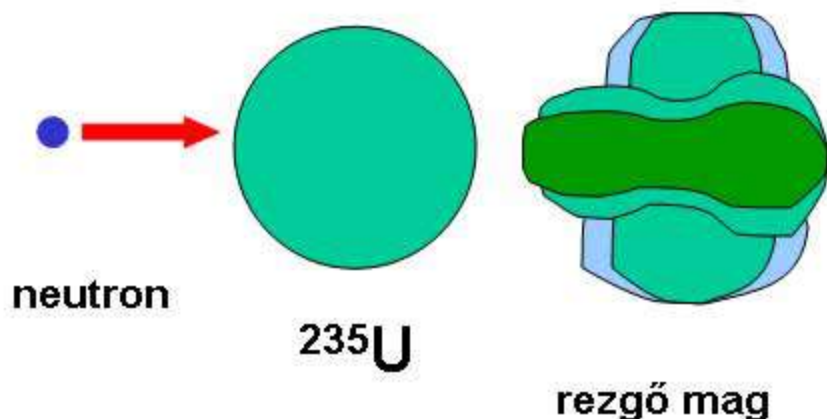


# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:

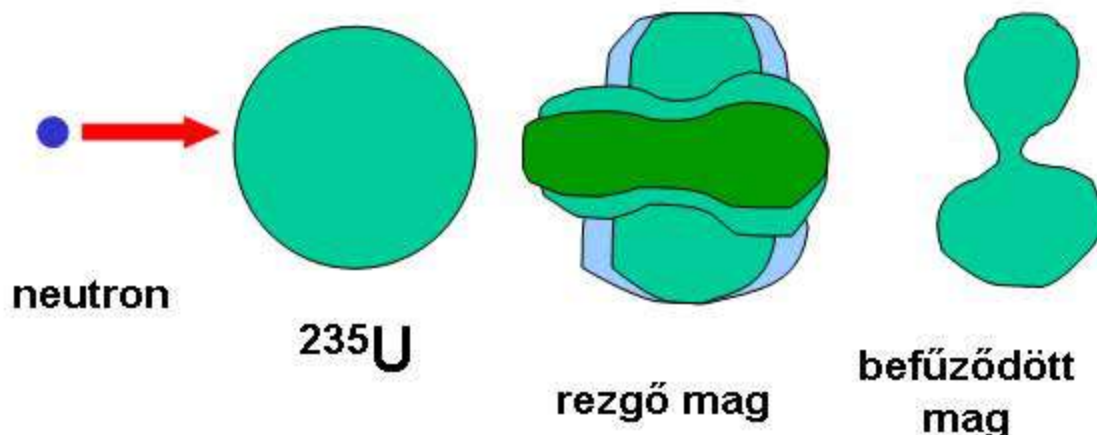


# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:

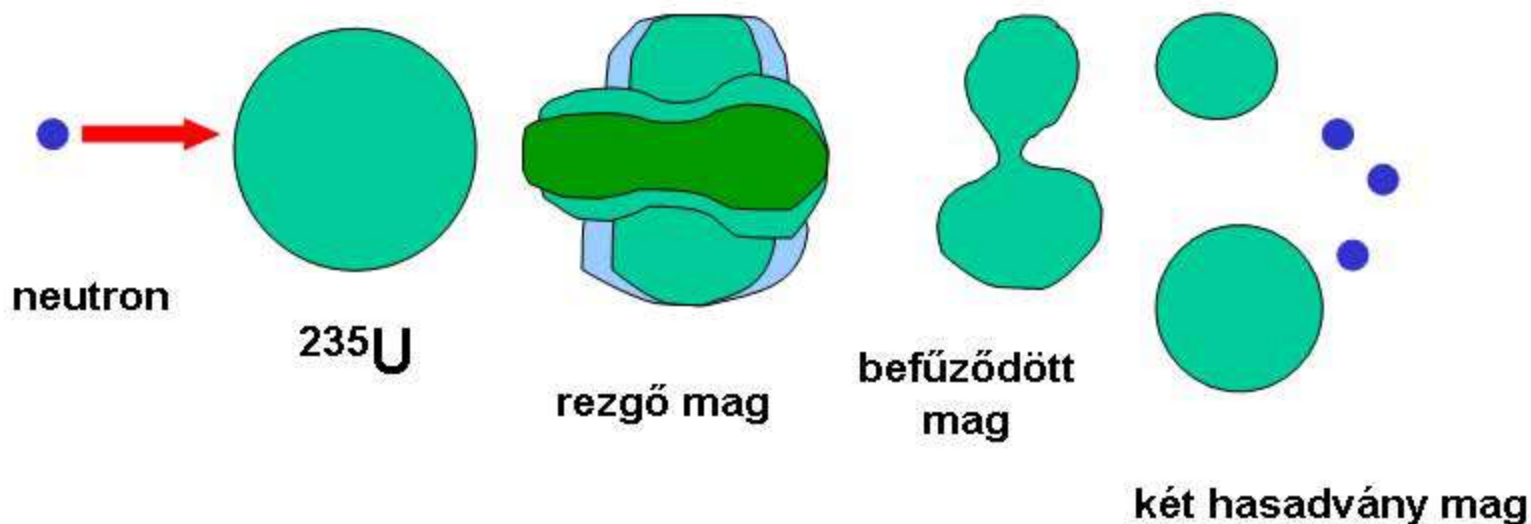


# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:

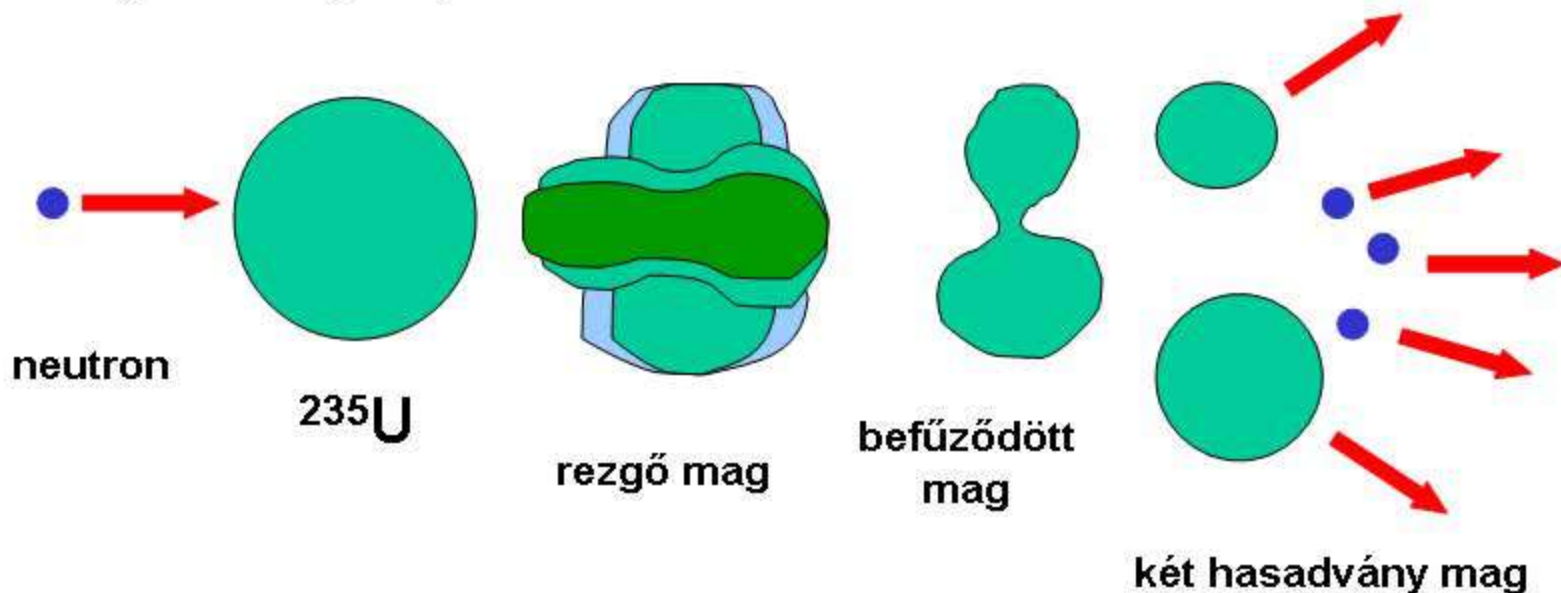




# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

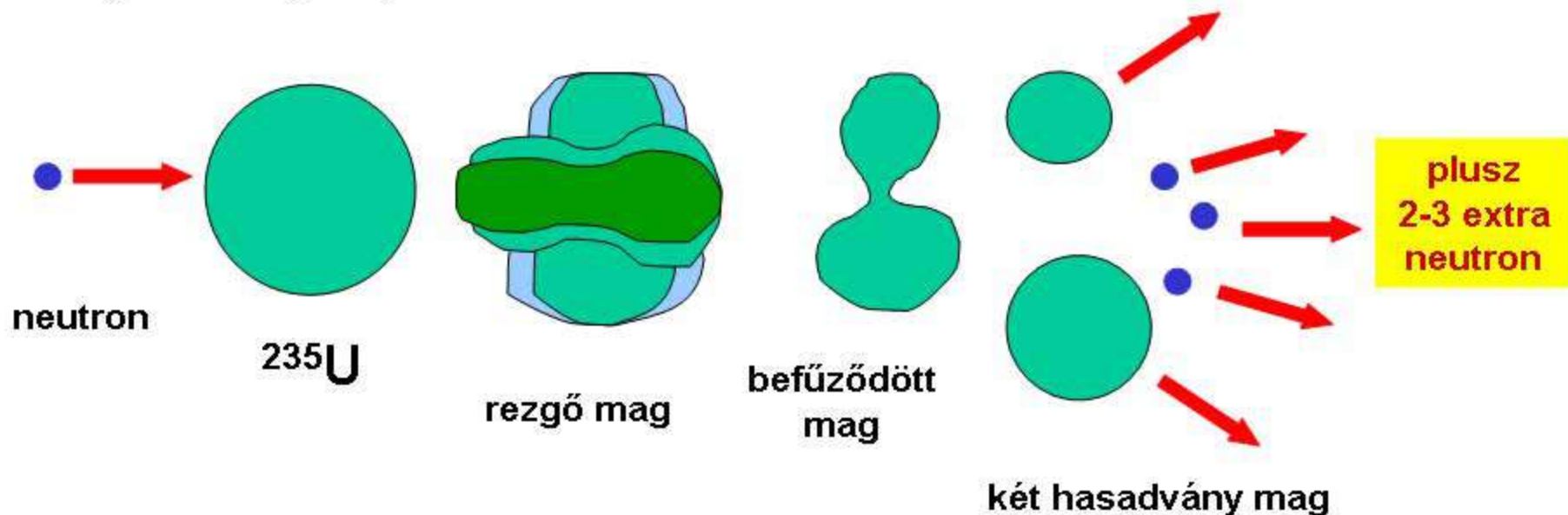
**DE:**  
ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:



# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**  
ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:

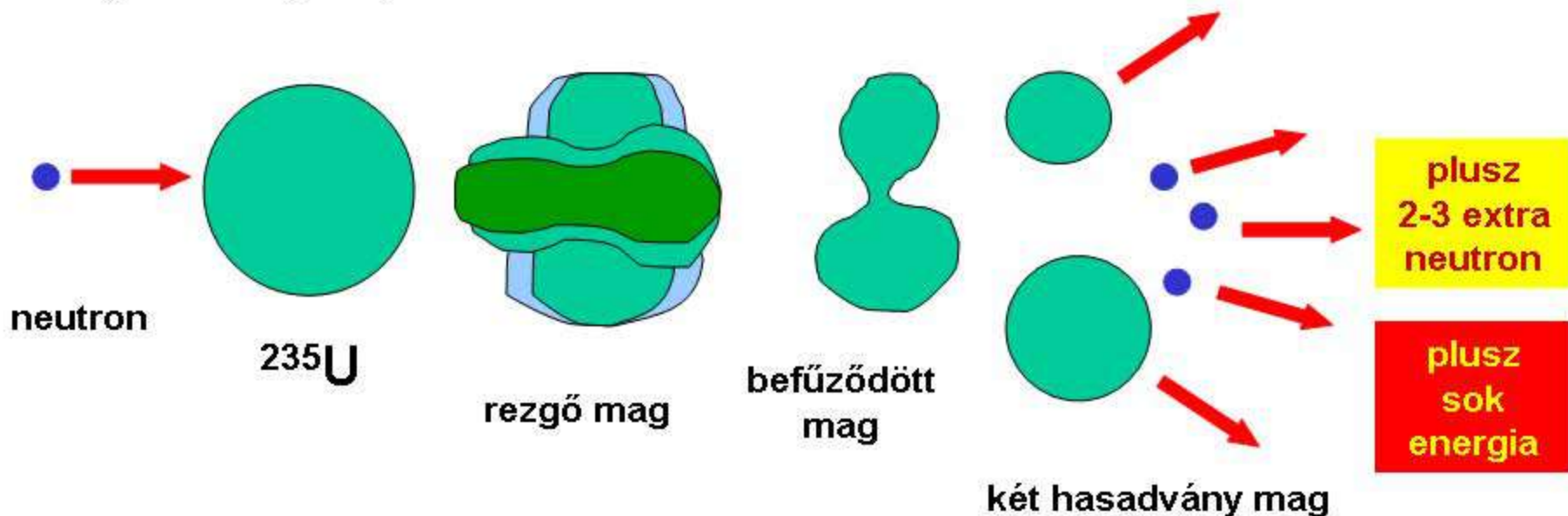


# Indukált (nem spontán) maghasadás

Az urán izotópjai nem stabilak – alfa-bomlással bomlanak, a felezési idő 4,5 milliárd év (kb. a Föld életkora).  
(Egyáltalán: mi az, hogy stabil?)

**DE:**

ha a  $^{235}\text{U}$  magot neutronnal megpiszkáljuk, rezegni kezd, majd elhasad:



# A maghasadáskor keletkező neutronok sorsa



## A maghasadáskor keletkező neutronok sorsa



kirepülhetnek a rendszerből

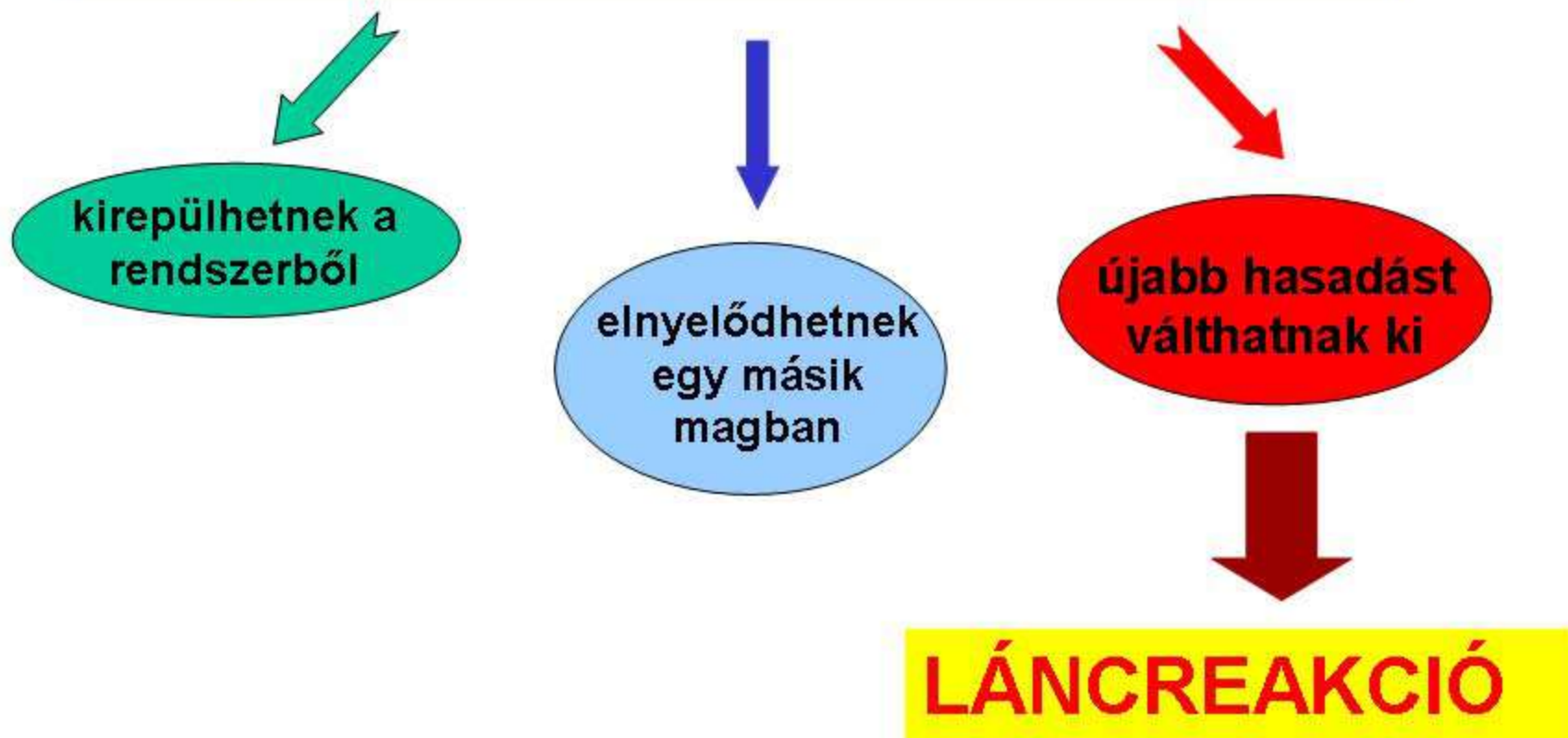
## A maghasadáskor keletkező neutronok sorsa



## A maghasadáskor keletkező neutronok sorsa

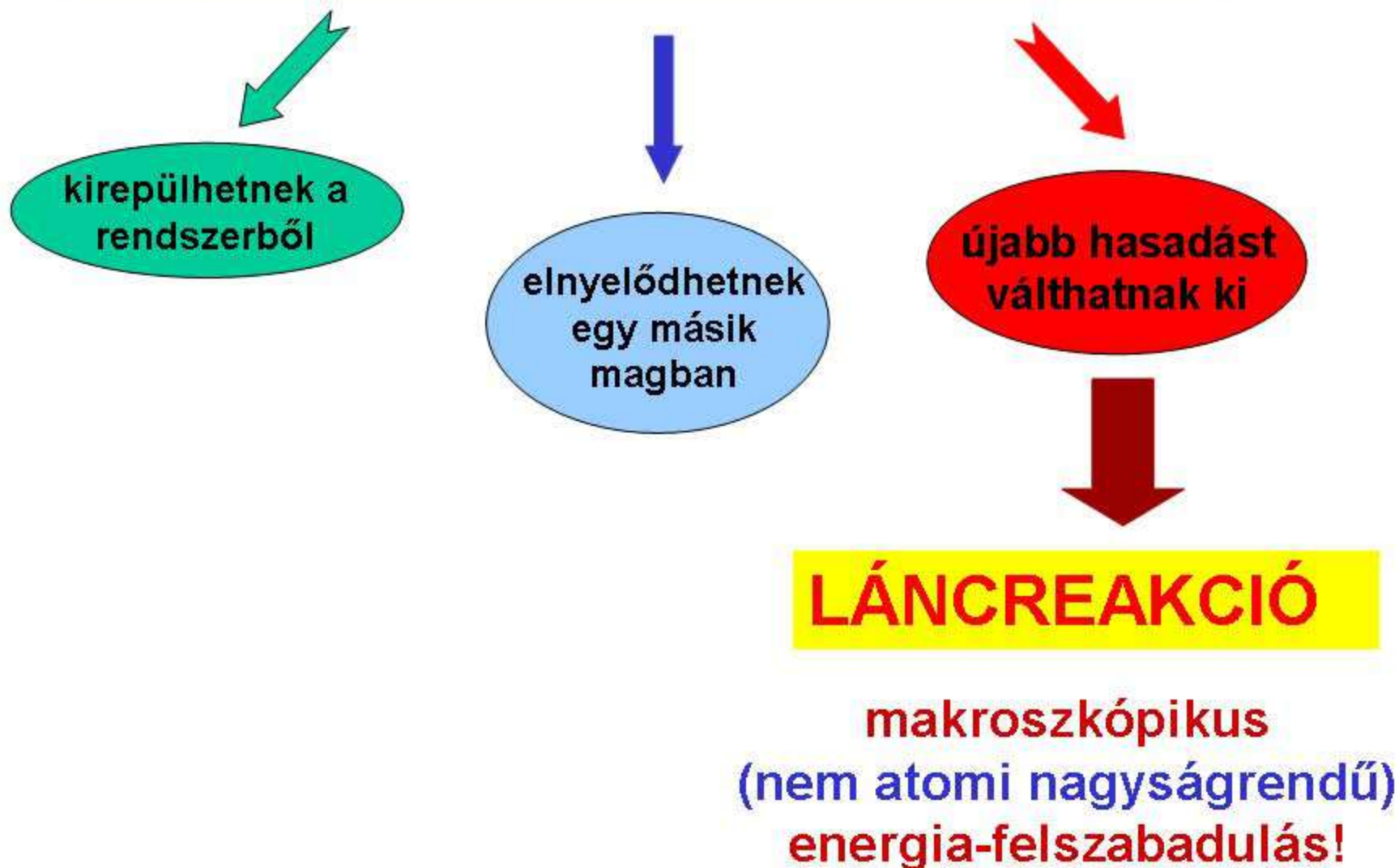


## A maghasadáskor keletkező neutronok sorsa

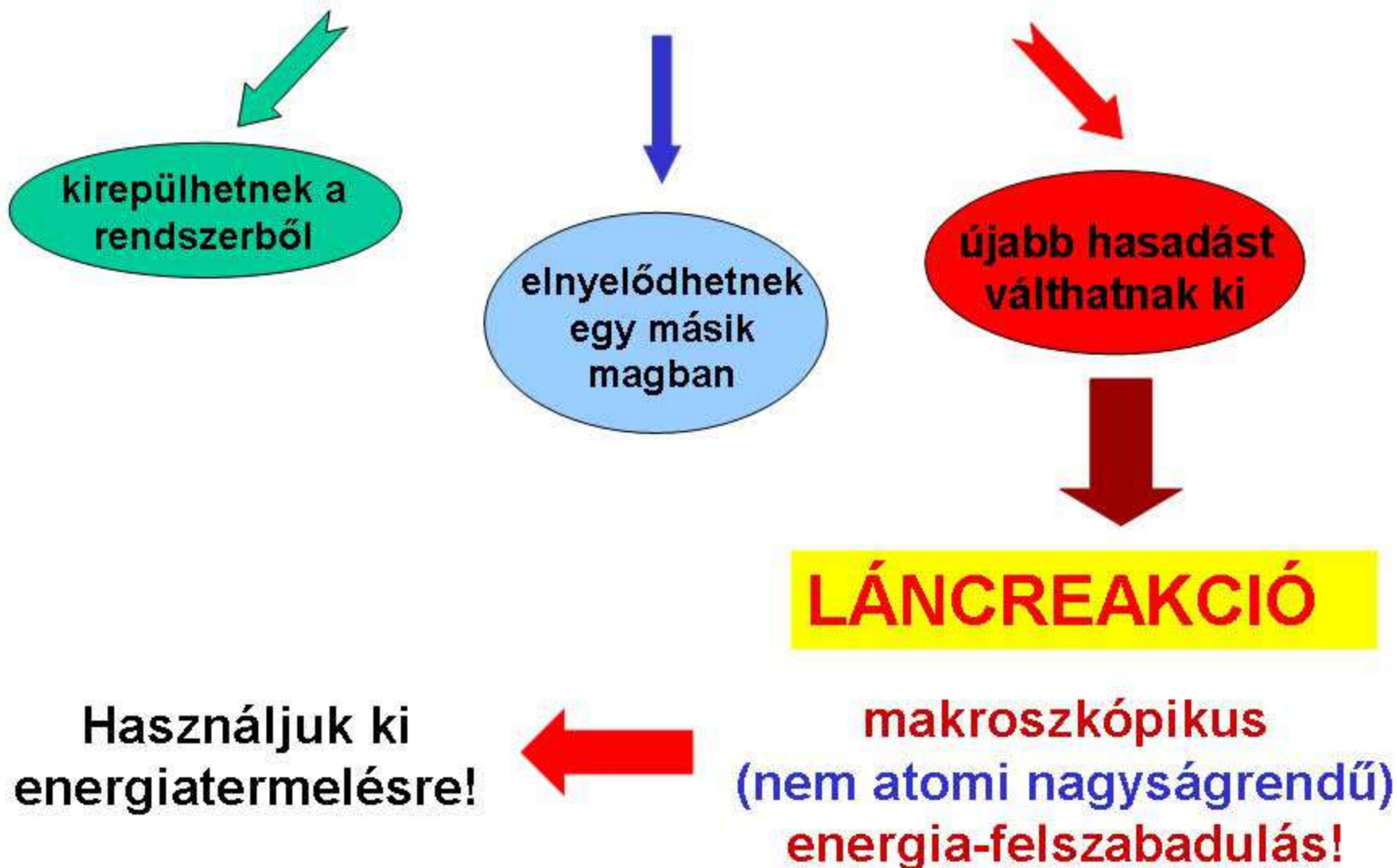




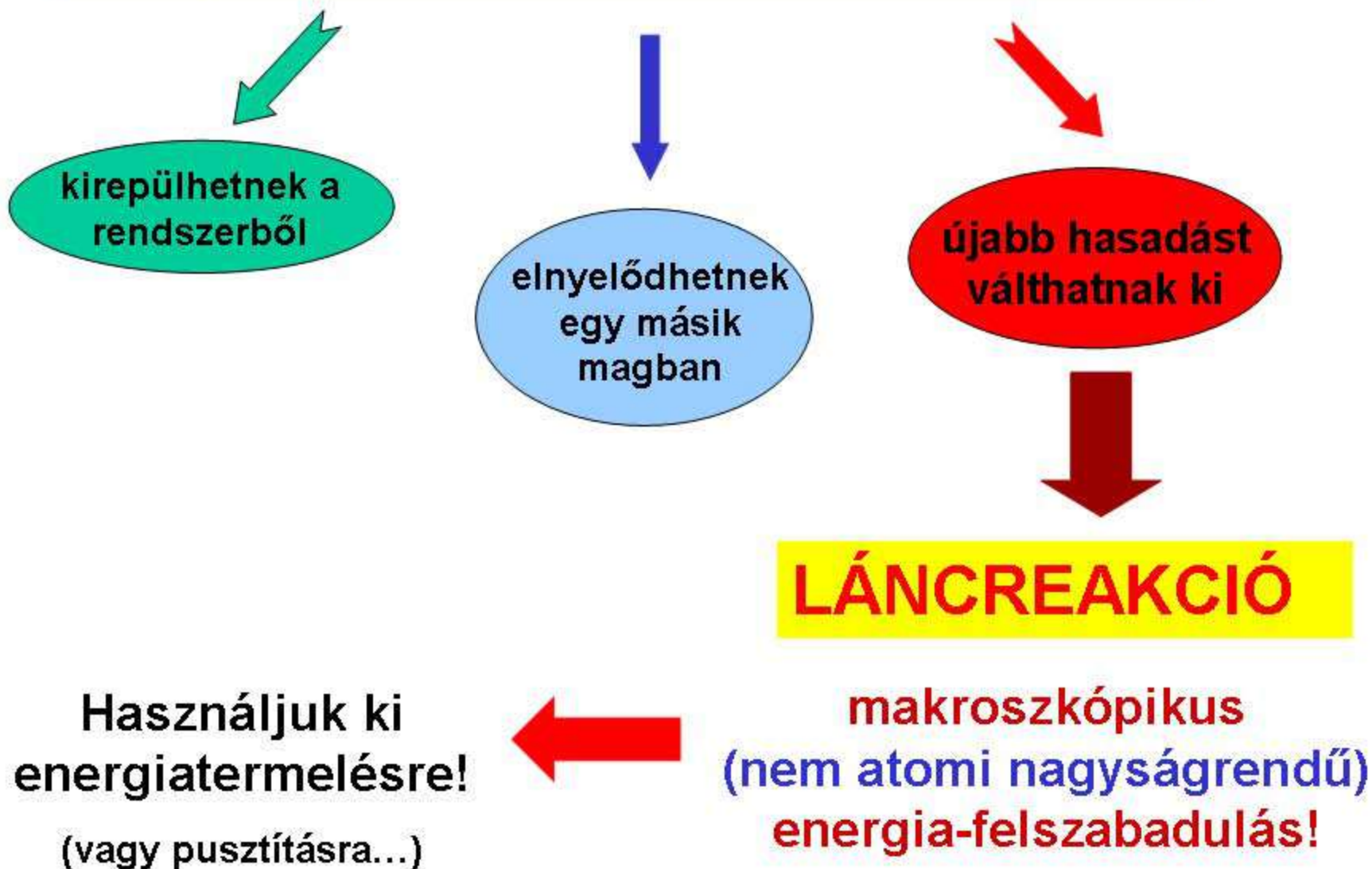
## A maghasadáskor keletkező neutronok sorsa



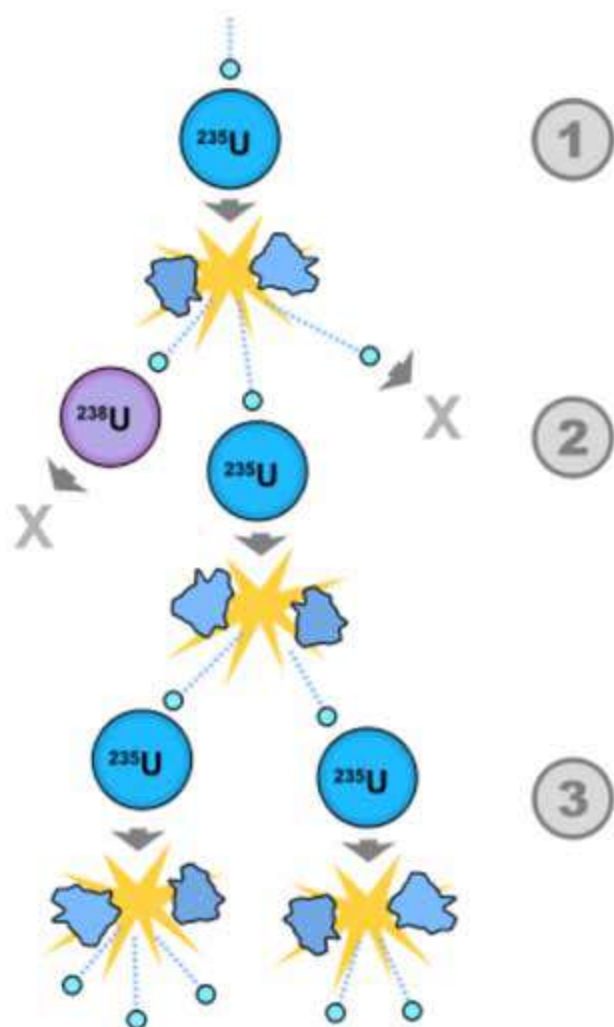
## A maghasadáskor keletkező neutronok sorsa



## A maghasadáskor keletkező neutronok sorsa



# LÁNCREAKCIÓ



# Az ördög a részletekben lakik



Az ördög a részletekben lakik



## Az ördög a részletekben lakik



- a hasadásra képes  $^{235}\text{U}$  magok aránya csak néhány % a nem hasadó  $^{238}\text{U}$  magok között



## Az ördög a részletekben lakik



- a hasadásra képes  $^{235}\text{U}$  magok aránya csak néhány % a nem hasadó  $^{238}\text{U}$  magok között
- hasítani csak lassú neutronok képesek, a keletkező neutronok viszont gyorsak

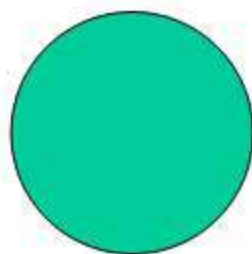




## Az ördög a részletekben lakik



- a hasadásra képes  $^{235}\text{U}$  magok aránya csak néhány % a nem hasadó  $^{238}\text{U}$  magok között
- hasítani csak lassú neutronok képesek, a keletkező neutronok viszont gyorsak

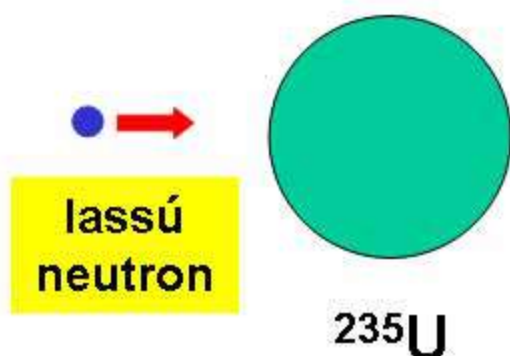


$^{235}\text{U}$

## Az ördög a részletekben lakik



- a hasadásra képes  $^{235}\text{U}$  magok aránya csak néhány % a nem hasadó  $^{238}\text{U}$  magok között
- hasítani csak lassú neutronok képesek, a keletkező neutronok viszont gyorsak

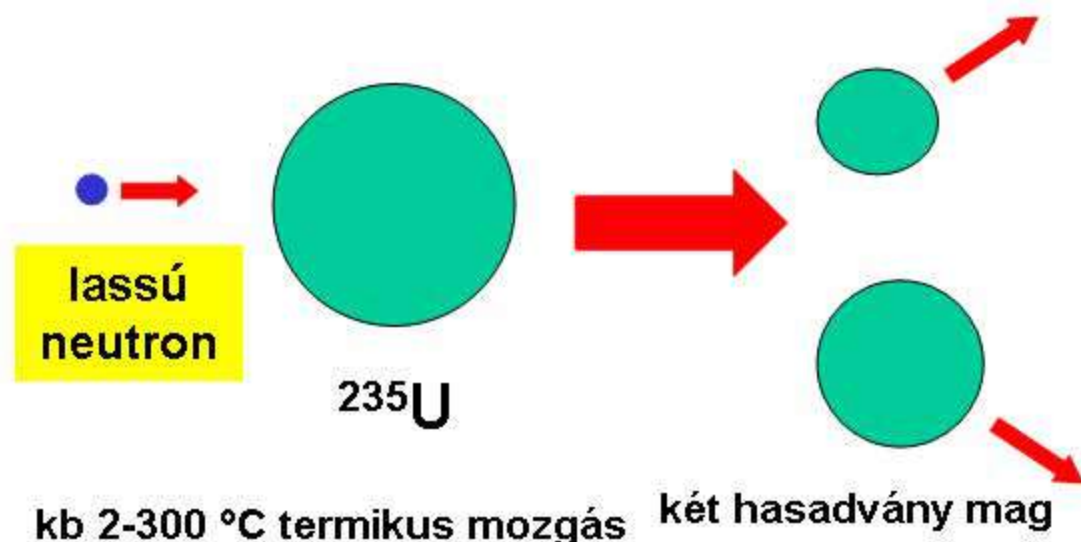


kb 2-300 °C termikus mozgás

## Az ördög a részletekben lakik



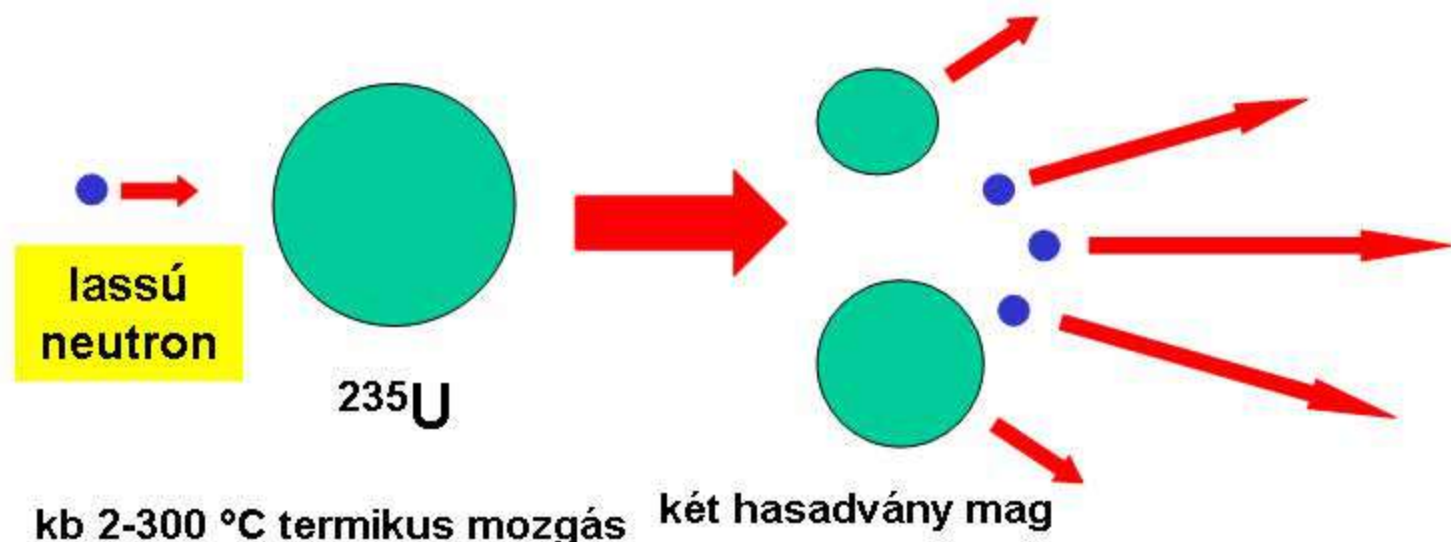
- a hasadásra képes  $^{235}\text{U}$  magok aránya csak néhány % a nem hasadó  $^{238}\text{U}$  magok között
- hasítani csak lassú neutronok képesek, a keletkező neutronok viszont gyorsak



## Az ördög a részletekben lakik



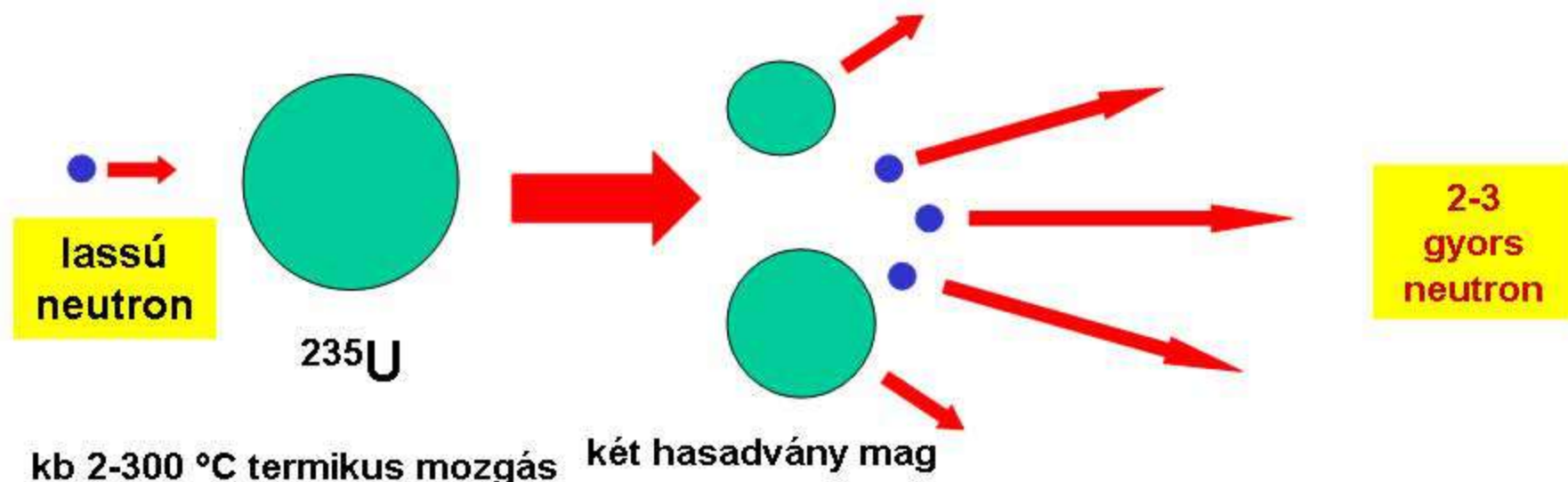
- a hasadásra képes  $^{235}\text{U}$  magok aránya csak néhány % a nem hasadó  $^{238}\text{U}$  magok között
- hasítani csak lassú neutronok képesek, a keletkező neutronok viszont gyorsak



## Az ördög a részletekben lakik



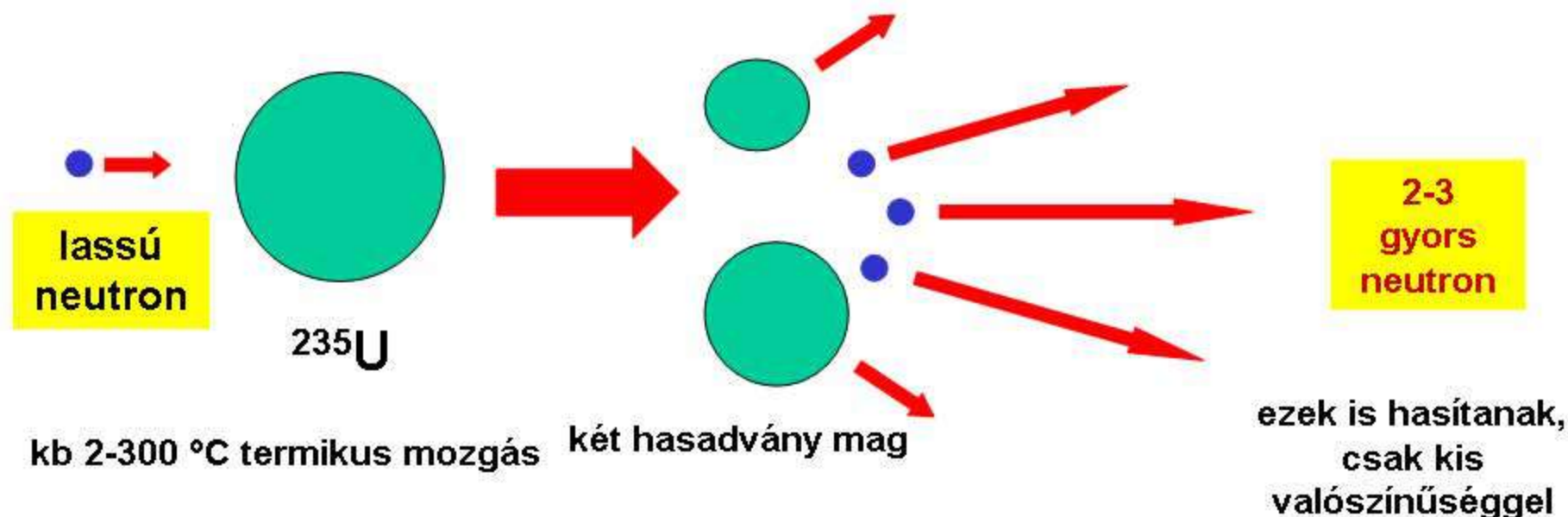
- a hasadásra képes  $^{235}\text{U}$  magok aránya csak néhány % a nem hasadó  $^{238}\text{U}$  magok között
- hasítani csak lassú neutronok képesek, a keletkező neutronok viszont gyorsak



## Az ördög a részletekben lakik



- a hasadásra képes  $^{235}\text{U}$  magok aránya csak néhány % a nem hasadó  $^{238}\text{U}$  magok között
- hasítani csak lassú neutronok képesek, a keletkező neutronok viszont gyorsak



# Megoldási stratégiák



# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force





# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**





## Megoldási stratégiák

### 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)





## Megoldási stratégiák

### 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$



# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$

Ez nehéz és drága, mert **NINCS KÉMIAI** különbség a  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  között



# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$

Ez nehéz és drága, mert **NINCS KÉMIAI** különbség a  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  között

Fizikai módszerek (gázállapotú vegyületek szeparálása több ezer ultracentrifugával)



# Megoldási stratégiák

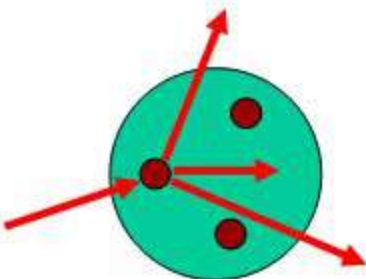


## 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$



Ez nehéz és drága, mert **NINCS KÉMIAI** különbség a  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  között

Fizikai módszerek (gázállapotú vegyületek szeparálása több ezer ultracentrifugával)



# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force

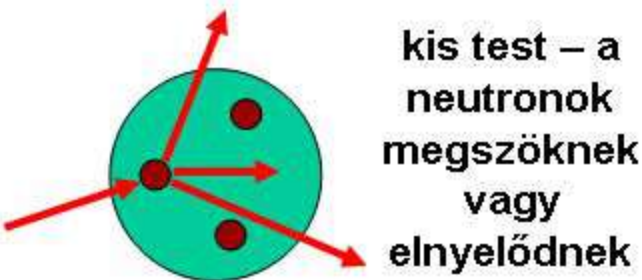
Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$

Ez nehéz és drága, mert **NINCS KÉMIAI** különbség a  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  között

Fizikai módszerek (gázállapotú vegyületek szeparálása több ezer ultracentrifugával)



# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

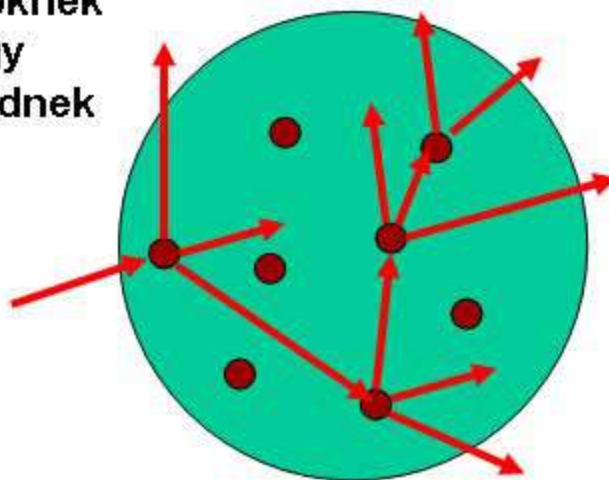
ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$

Ez nehéz és drága, mert **NINCS KÉMIAI** különbség a  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  között

Fizikai módszerek (gázállapotú vegyületek szeparálása több ezer ultracentrifugával)

kis test – a neutronok megszöknek vagy elnyelődnek





# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

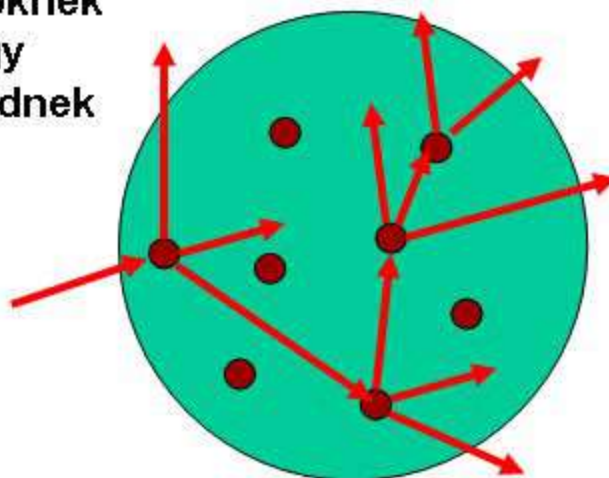
$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$

Ez nehéz és drága, mert NINCS KÉMIAI különbség a  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  között

Fizikai módszerek (gázállapotú vegyületek szeparálása több ezer ultracentrifugával)

kis test – a neutronok megszöknek vagy elnyelődnek

elegendően nagy test – átlagosan legalább egy gyors neutron talál hasítani való magot



# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$

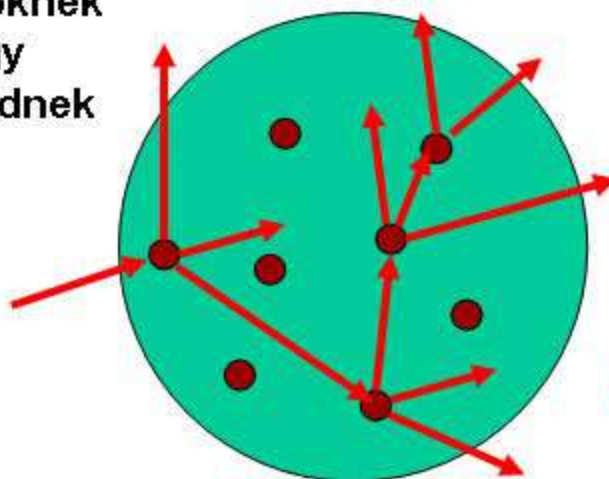
Ez nehéz és drága, mert NINCS KÉMIAI különbség a  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  között

Fizikai módszerek (gázállapotú vegyületek szeparálása több ezer ultracentrifugával)

határ:  
**a kritikus tömeg**  $m^*$

kis test – a neutronok megszöknek vagy elnyelődnek

elegendően nagy test – átlagosan legalább egy gyors neutron talál hasítani való magot



# Megoldási stratégiák



## 1. Brute force

Használjunk **SOK ANYAGOT!**

ráadásul **dúsítva** (növeljük meg a  $^{235}\text{U}$  arányát)

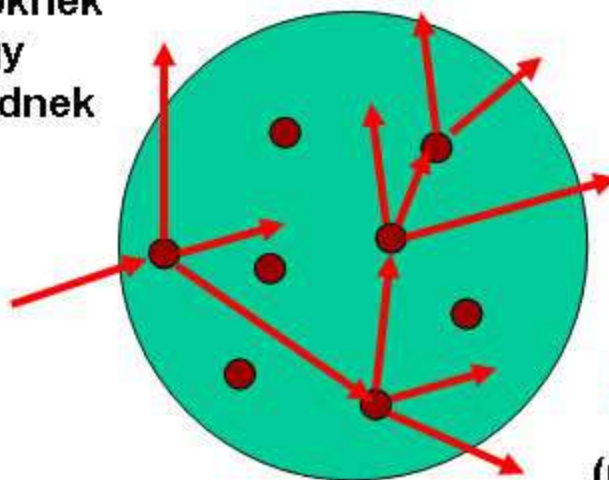
$$^{235}\text{U} / \text{U} \approx 80\%$$

Ez nehéz és drága, mert NINCS KÉMIAI különbség a  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  között

Fizikai módszerek (gázállapotú vegyületek szeparálása több ezer ultracentrifugával)

kis test – a neutronok megszöknek vagy elnyelődnek

elegendően nagy test – átlagosan legalább egy gyors neutron talál hasítani való magot



határ:

**a kritikus tömeg  $m^*$**

(néhányszor 10 kg körül van)



Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



**Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...**

de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???



## Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...

de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

Mert csak előkészítik, de nem rakják össze  
a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!



## Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

Mert csak előkészítik, de nem rakják össze  
a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



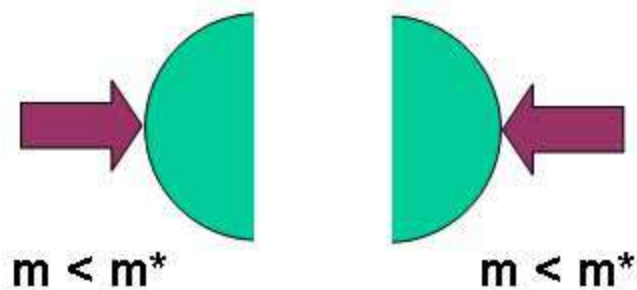
## Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell





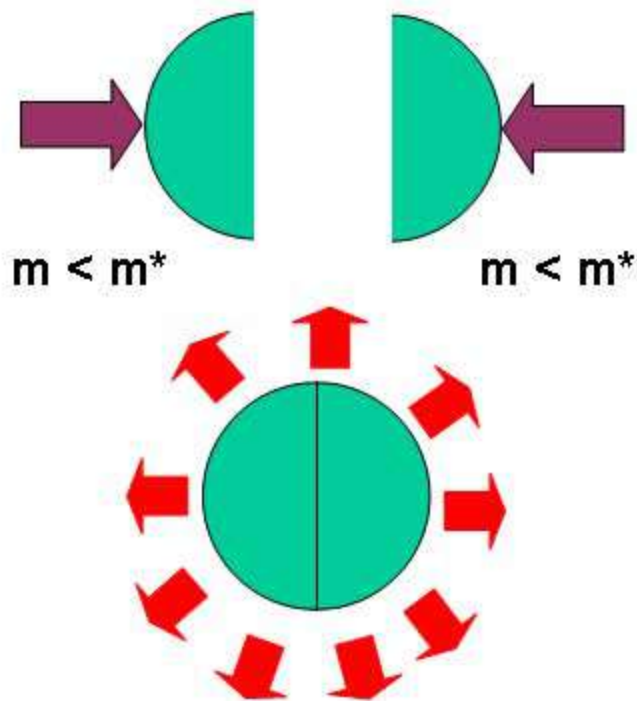
## Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



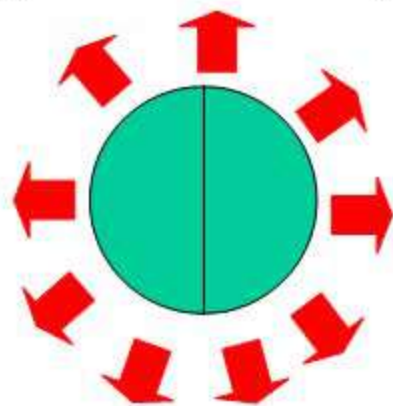
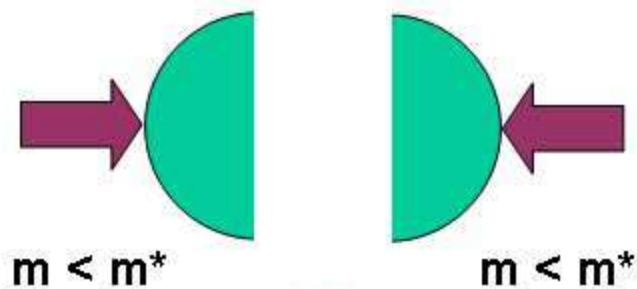
## Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



$2 m > m^*$



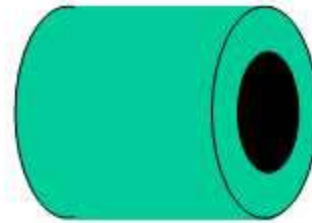
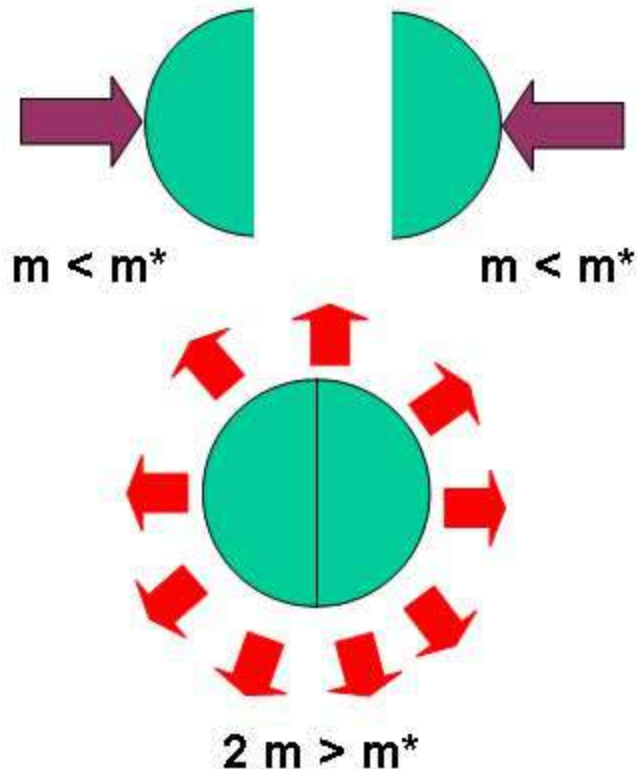
# Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



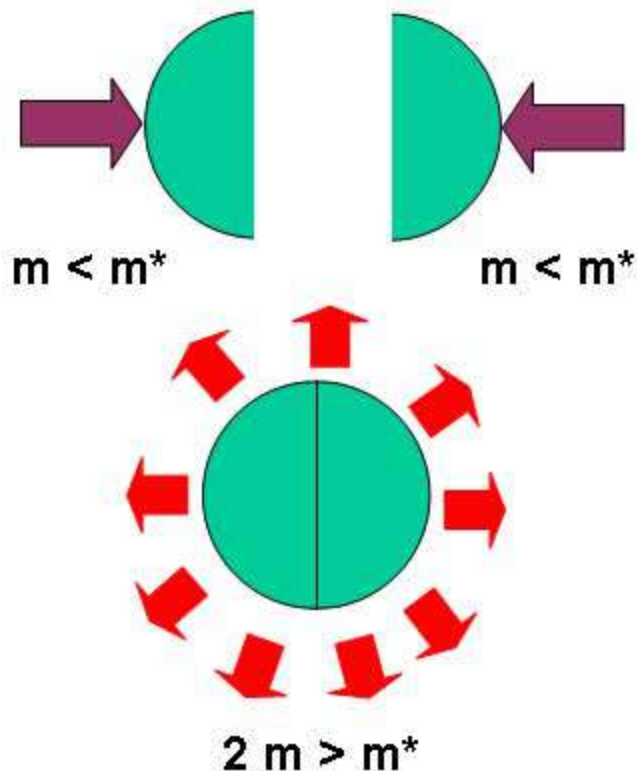
# Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



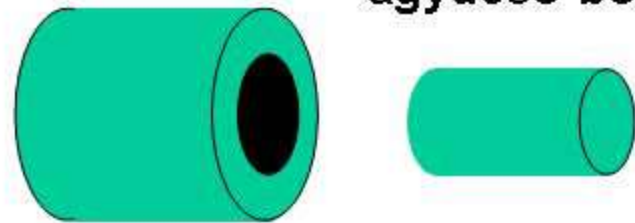
de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



ágyúcső-bomba



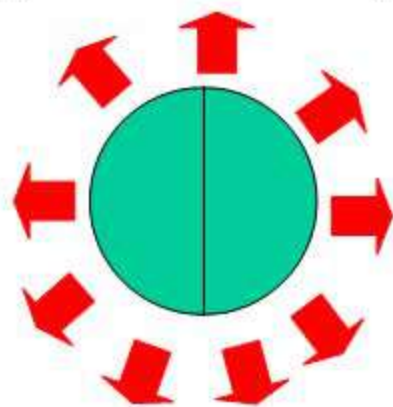
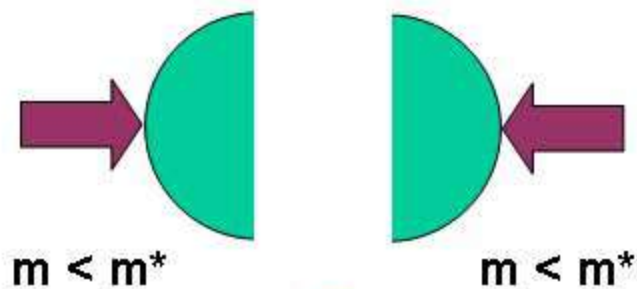
# Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



ágyúcső-bomba



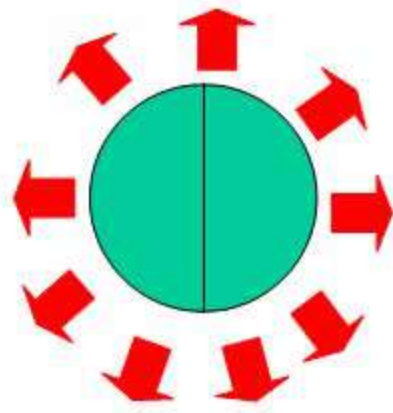
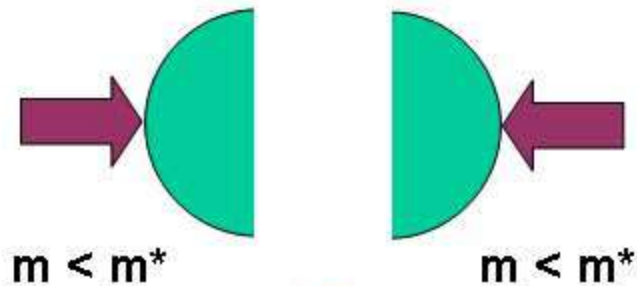
# Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

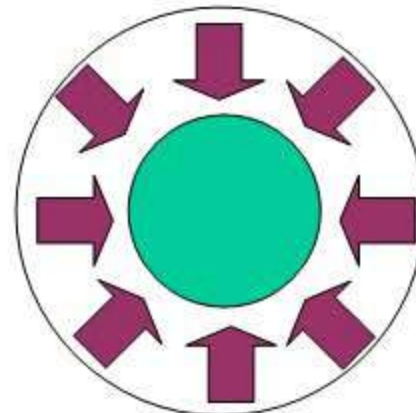
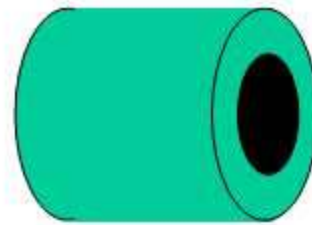
Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



$2 m > m^*$

ágyúcső-bomba



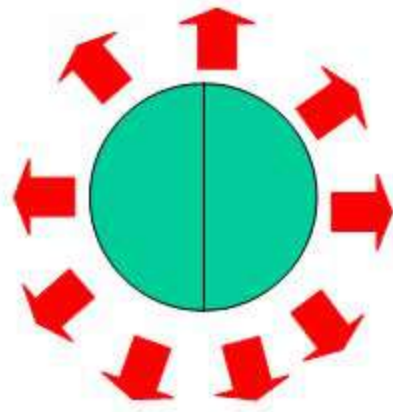
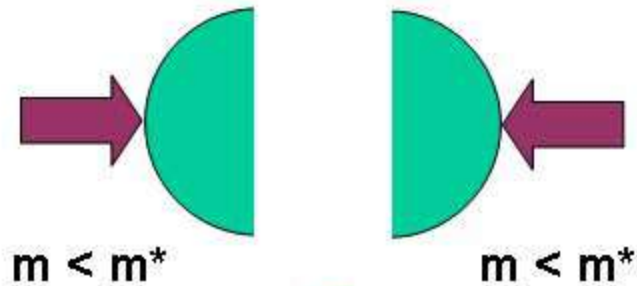
# Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

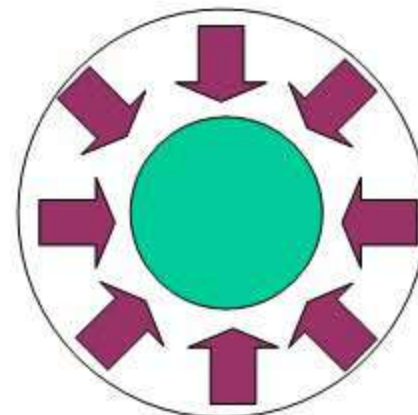
Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



$2m > m^*$

ágyúcső-bomba



radiális berobbantás



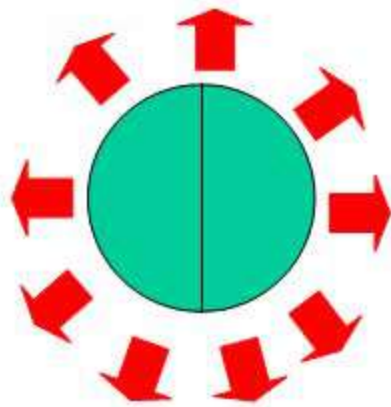
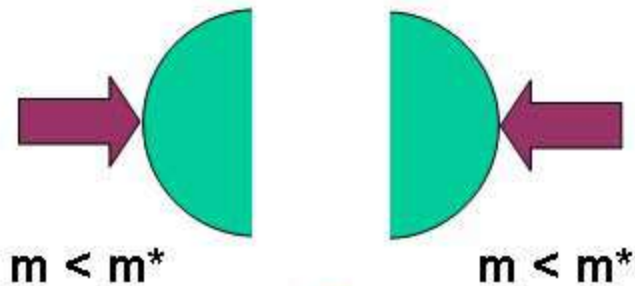
# Ha együtt a kritikus tömeg, megindul a láncreakció...



de miért nem robban fel a rendszer már készítésekor???

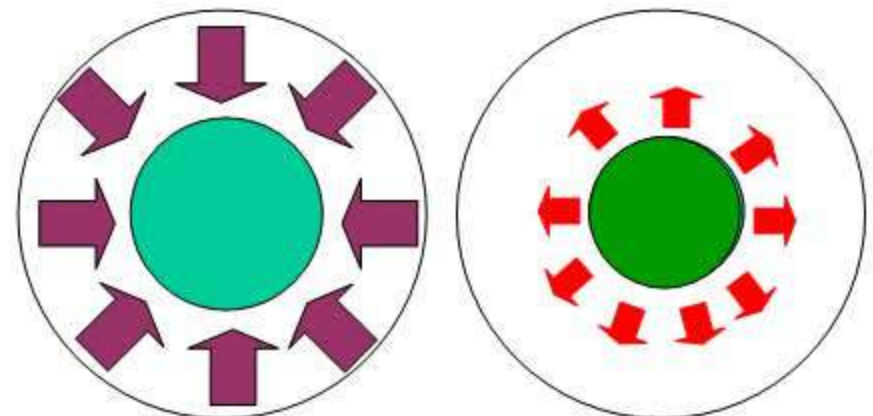
Mert csak előkészítik, de nem rakják össze a kritikus tömegnyi hasadóanyagot!

elvi modell



$2 m > m^*$

ágyúcső-bomba



radiális berobbantás







**beindul és  
felgyorsul a  
láncreakció –  
pillanatok alatt  
felszabadul a  
rendszerből az  
összes energia**





beindul és  
felgyorsul a  
láncreakció –  
pillanatok alatt  
felszabadul a  
rendszerből az  
összes energia



# Megoldási stratégiák



# Megoldási stratégiák



# Megoldási stratégiák

## 2. Mérsékeljük magunkat!



# Megoldási stratégiák

## 2. Mérsékeljük magunkat!

(azaz a neutronokat)



# Megoldási stratégiák

## 2. Mérsékeljük magunkat!

(azaz a neutronokat)



lassítás ütközéssel

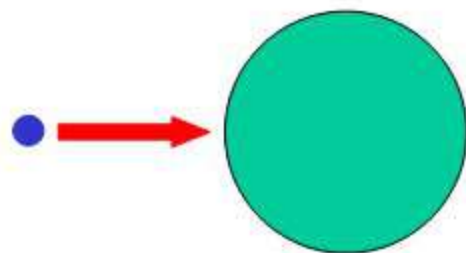
# Megoldási stratégiák

## 2. Mérsékeljük magunkat!

(azaz a neutronokat)



lassítás ütközéssel





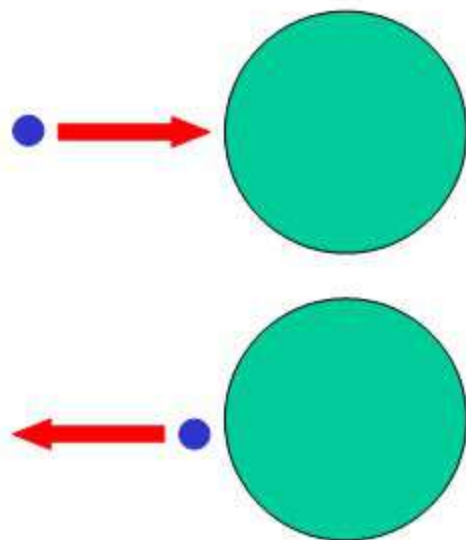
# Megoldási stratégiák

## 2. Mérsékeljük magunkat!

(azaz a neutronokat)



lassítás ütközéssel



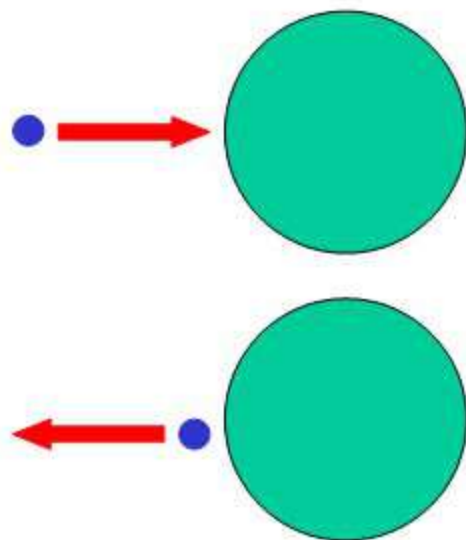
# Megoldási stratégiák

## 2. Mérsékeljük magunkat!

(azaz a neutronokat)



lassítás ütközéssel



$$m_n \ll M$$



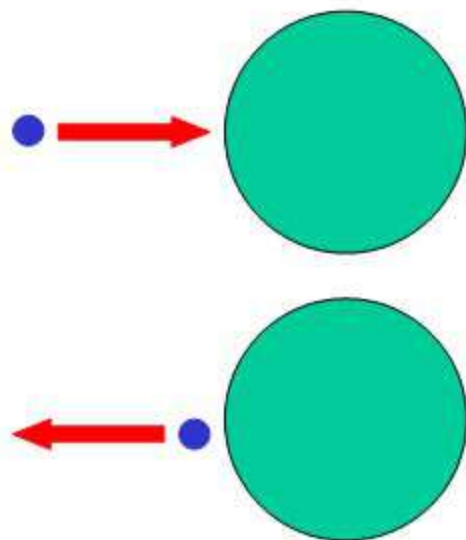
# Megoldási stratégiák



## 2. Mérsékeljük magunkat!

(azaz a neutronokat)

lassítás ütközéssel



$$m_n \ll M$$

a neutron visszapattan



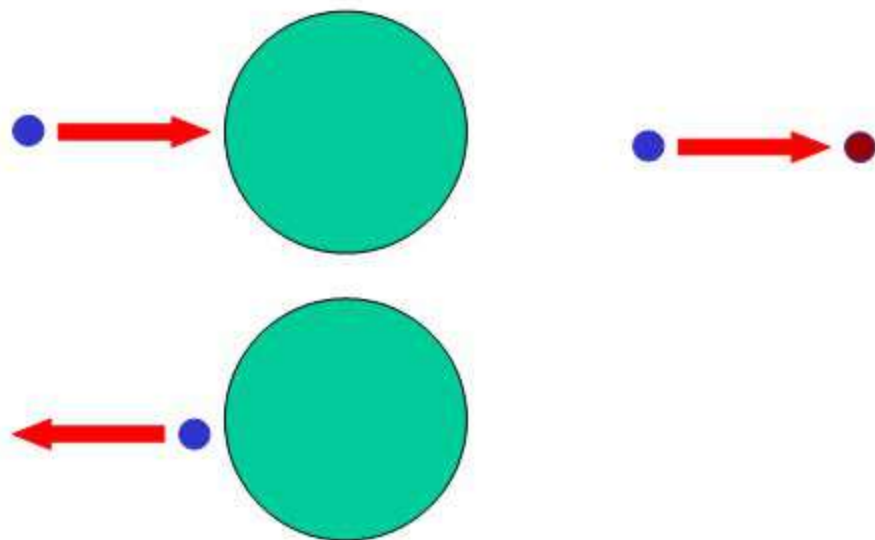
# Megoldási stratégiák



## 2. Mérsékeljük magunkat!

(azaz a neutronokat)

lassítás ütközéssel



$$m_n \ll M$$

a neutron visszapattan



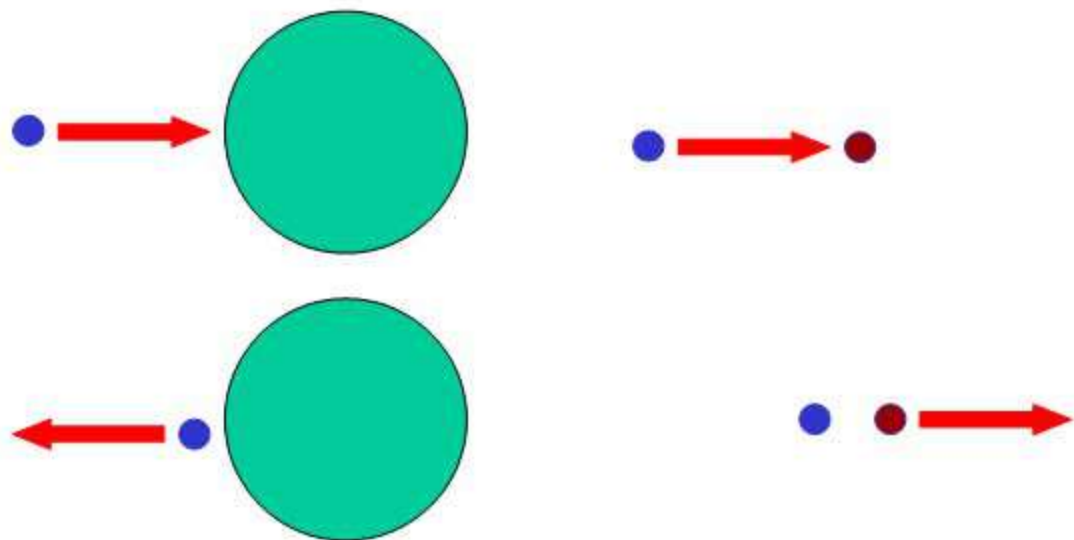
# Megoldási stratégiák



## 2. Mérsékeljük magunkat!

(azaz a neutronokat)

lassítás ütközéssel



$$m_n \ll M$$

a neutron visszapattan

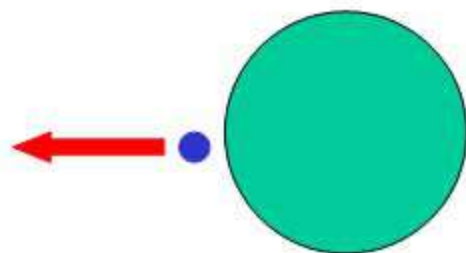
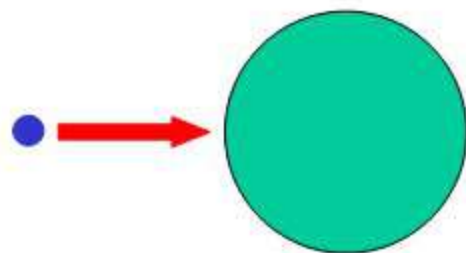


# Megoldási stratégiák



## 2. Mérsékeljük magunkat! (azaz a neutronokat)

lassítás ütközéssel



$$m_n \ll M$$

$$m_n = M$$

a neutron visszapattan

a neutron megáll

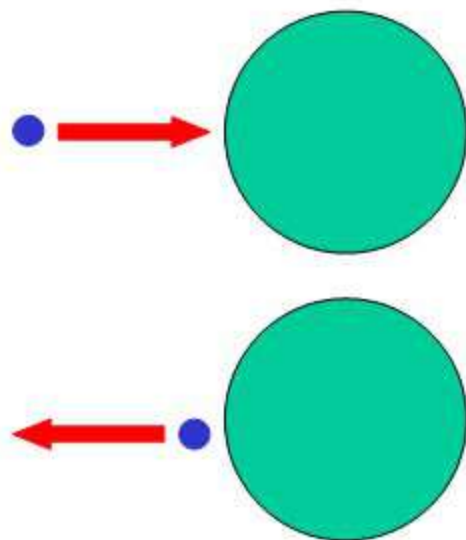


# Megoldási stratégiák



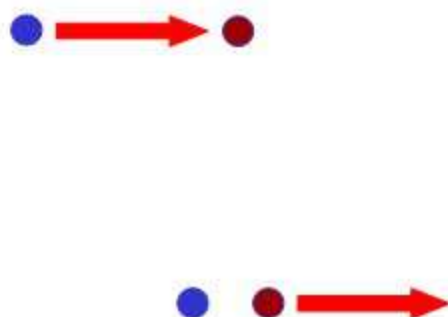
## 2. Mérsékeljük magunkat! (azaz a neutronokat)

lassítás ütközéssel



$$m_n \ll M$$

a neutron visszapattan



$$m_n = M$$

a neutron megáll



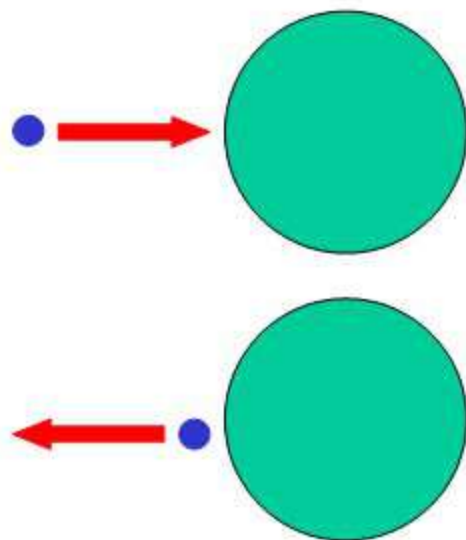
# Megoldási stratégiák



## 2. Mérsékeljük magunkat!

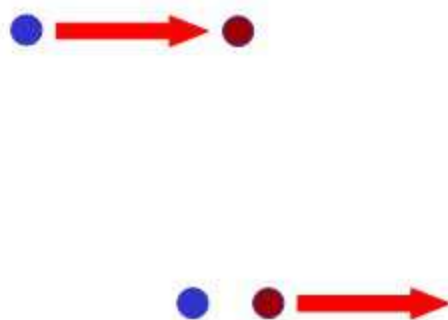
(azaz a neutronokat)

lassítás ütközéssel



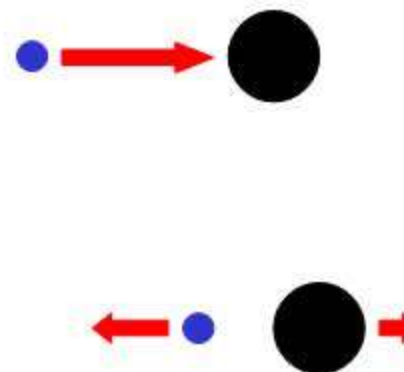
$$m_n \ll M$$

a neutron visszapattan



$$m_n = M$$

a neutron megáll





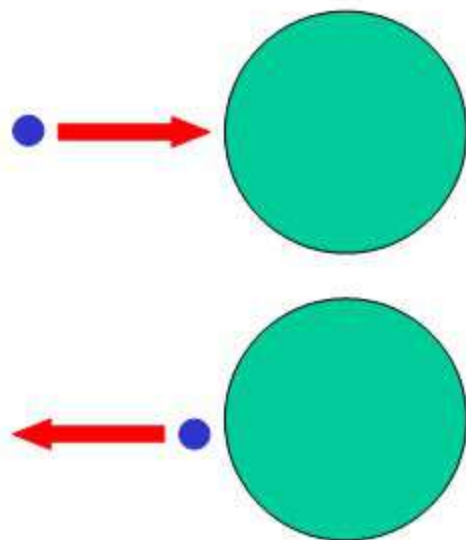
# Megoldási stratégiák



## 2. Mérsékeljük magunkat!

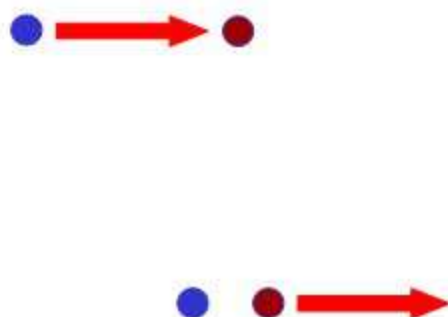
(azaz a neutronokat)

lassítás ütközéssel



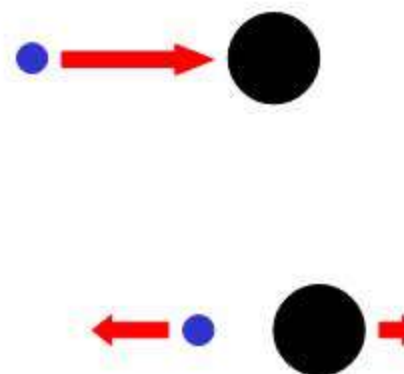
$$m_n \ll M$$

a neutron visszapattan



$$m_n = M$$

a neutron megáll



$$m_n < M$$

a neutron lelassul





# Mi az optimális lassító anyag?



## Mi az optimális lassító anyag?

$$m_n \approx m_p$$



## Mi az optimális lassító anyag?

$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutront!



## Mi az optimális lassító anyag?

$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!



Milyen anyagban van sok magányos proton?

Mi az optimális lassító anyag?

$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!



Milyen anyagban van sok magányos proton? a hidrogénben!



Mi az optimális lassító anyag?

$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!



Milyen anyagban van sok magányos proton? a hidrogénben!

De a hidrogéngáz ritka, a folyékony hidrogén meg hideg...





Mi az optimális lassító anyag?

$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!



Milyen anyagban van sok magányos proton? a hidrogénben!

De a hidrogéngáz ritka, a folyékony hidrogén meg hideg...

**Optimális megoldás: a víz**



Mi az optimális lassító anyag?

$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!



Milyen anyagban van sok magányos proton? a hidrogénben!

De a hidrogéngáz ritka, a folyékony hidrogén meg hideg...

**Optimális megoldás: a víz**

Jelentős része hidrogén,  
és viszonylag sűrű  
még 200 fokon is.



## Mi az optimális lassító anyag?

$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!



Milyen anyagban van sok magányos proton? **a hidrogénben!**

De a hidrogéngáz ritka, a folyékony hidrogén meg hideg...

**Optimális megoldás: a víz**

Jelentős része hidrogén,  
és viszonylag sűrű  
még 200 fokon is.

De a víz nem szerkezeti anyag:  
nem lehet belőle megépíteni a  
berendezést:  
kell egy fix méretű fémtartály –  
nehéz tovább bővíteni



## Mi az optimális lassító anyag?

$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!



Milyen anyagban van sok magányos proton? **a hidrogénben!**

De a hidrogéngáz ritka, a folyékony hidrogén meg hideg...

**Optimális megoldás: a víz**

Jelentős része hidrogén,  
és viszonylag sűrű  
még 200 fokon is.

De a víz nem szerkezeti anyag:  
nem lehet belőle megépíteni a  
berendezést:

kell egy fix méretű fémtartály –  
nehéz tovább bővíteni

**kompromisszumos megoldás:  
a szén, a grafit**



## Mi az optimális lassító anyag?



$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!

Milyen anyagban van sok magányos proton? **a hidrogénben!**

De a hidrogéngáz ritka, a folyékony hidrogén meg hideg...

**Optimális megoldás: a víz**

De a víz nem szerkezeti anyag:  
nem lehet belőle megépíteni a  
berendezést:

kell egy fix méretű fémtartály –  
nehéz tovább bővíteni

**kompromisszumos megoldás:  
a szén, a grafit**

Jelentős része hidrogén,  
és viszonylag sűrű  
még 200 fokon is.

Elég jól lassítja  
a neutronokat,  
és szerkezeti anyagnak  
is megfelel



## Mi az optimális lassító anyag?



$m_n \approx m_p$  a proton majdnem megállítja a neutron!

Milyen anyagban van sok magányos proton? **a hidrogénben!**

De a hidrogéngáz ritka, a folyékony hidrogén meg hideg...

**Optimális megoldás: a víz**

De a víz nem szerkezeti anyag:  
nem lehet belőle megépíteni a  
berendezést:

kell egy fix méretű fémtartály –  
nehéz tovább bővíteni

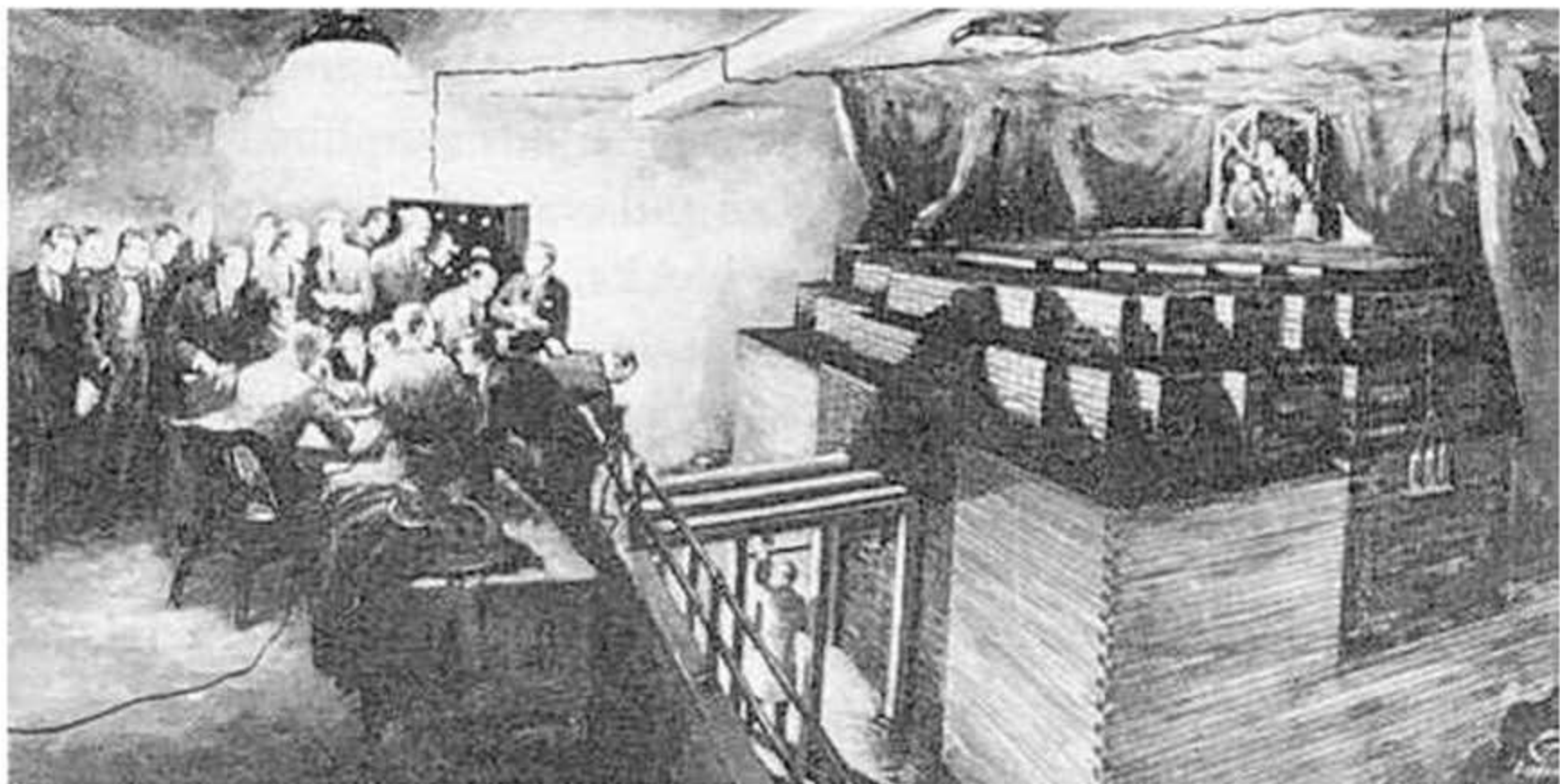
**kompromisszumos megoldás:  
a szén, a grafit**

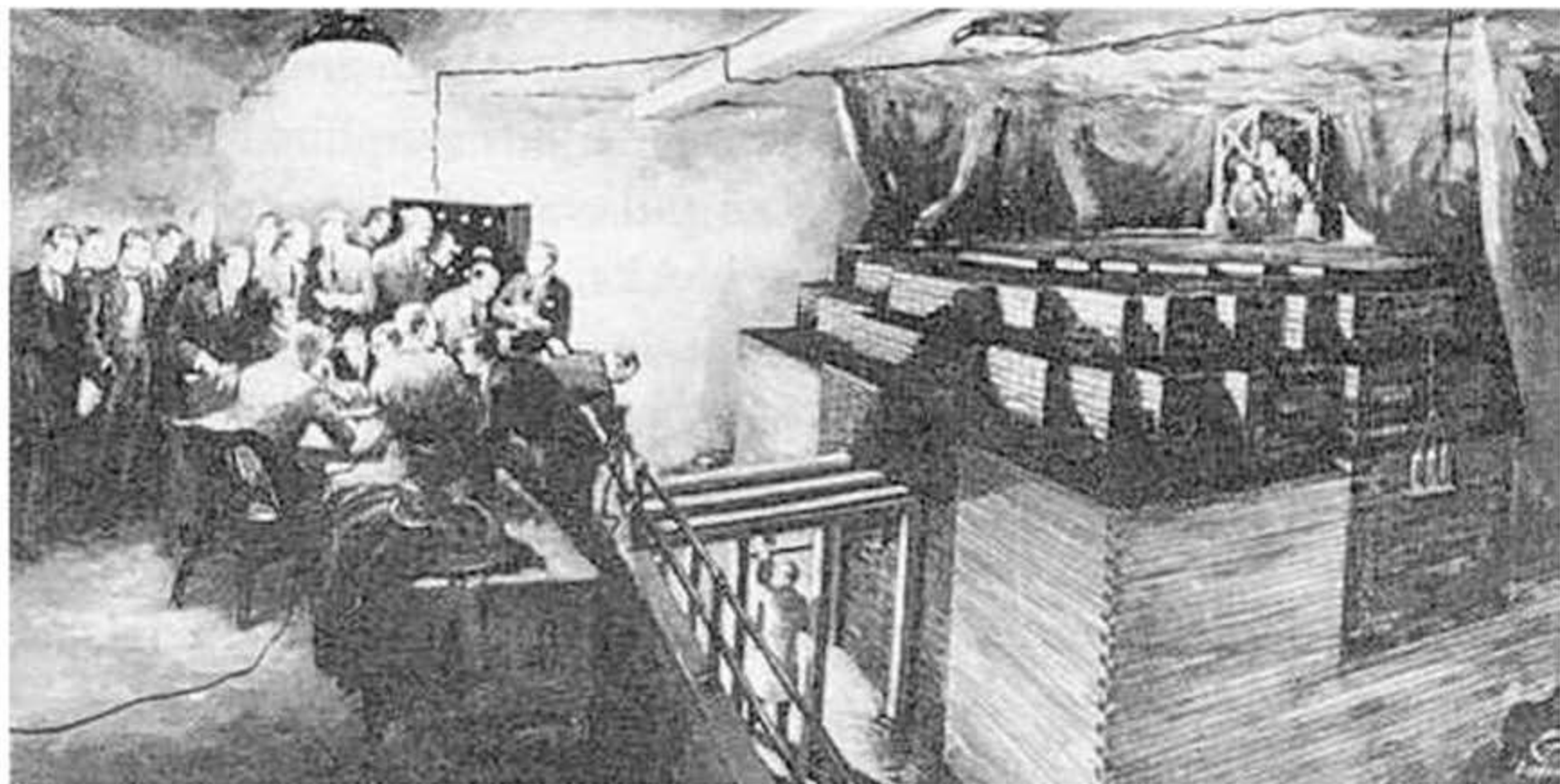
Jelentős része hidrogén,  
és viszonylag sűrű  
még 200 fokon is.

Elég jól lassítja  
a neutronokat,  
és szerkezeti anyagnak  
is megfelel

**„atommáglya”**



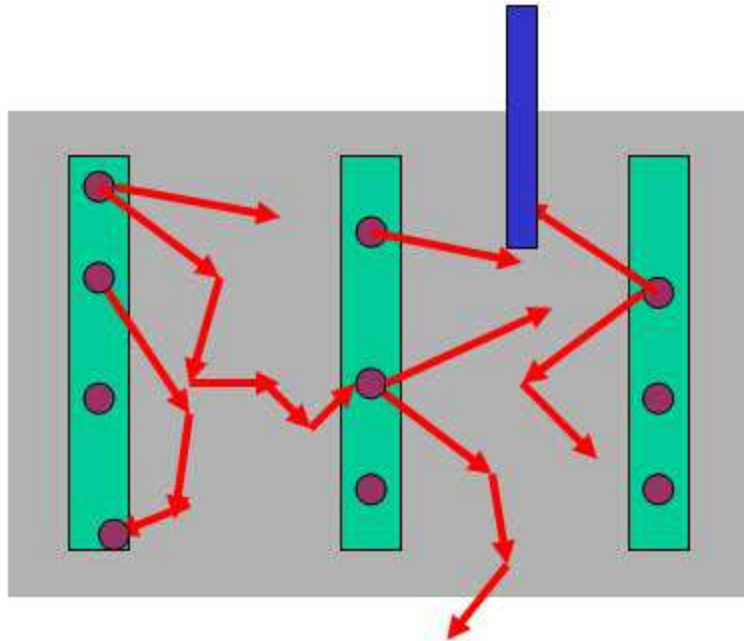




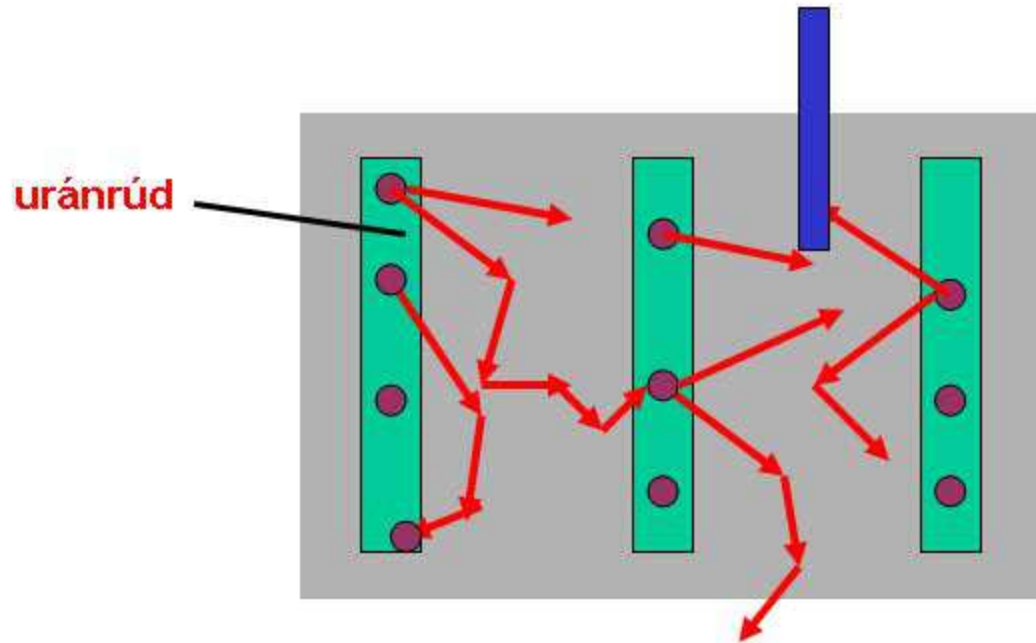
## Az első kísérleti atomreaktor beindítása Chicago, 1942. december 2.



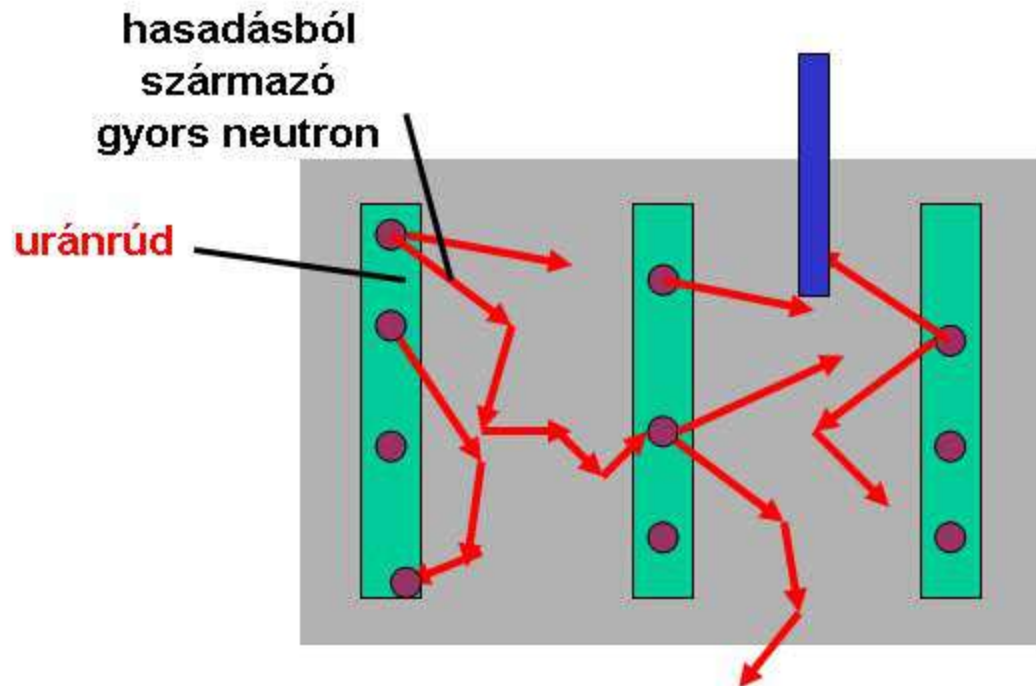
# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



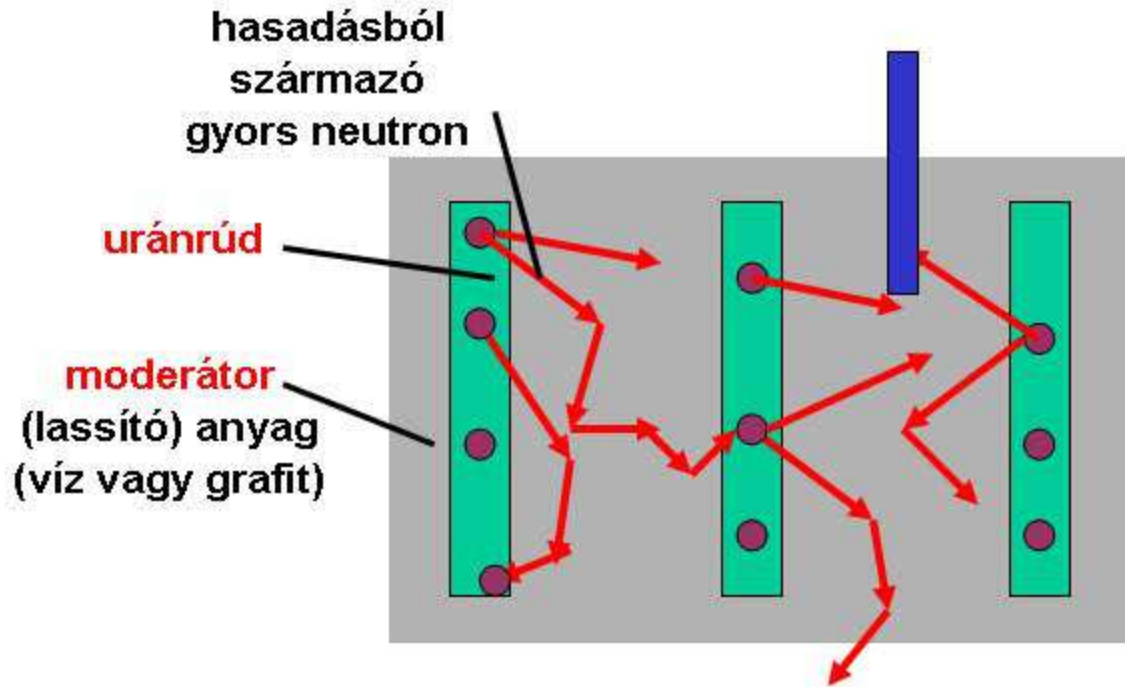
# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



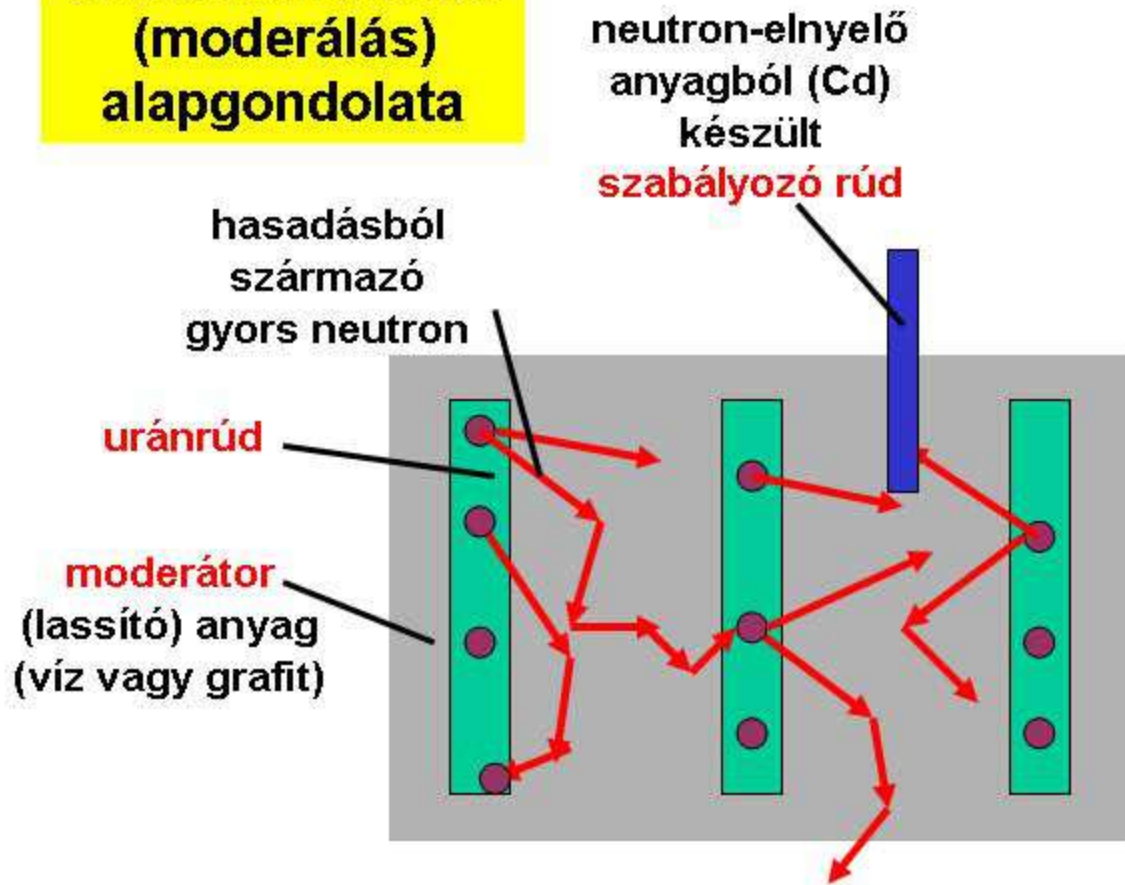
# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



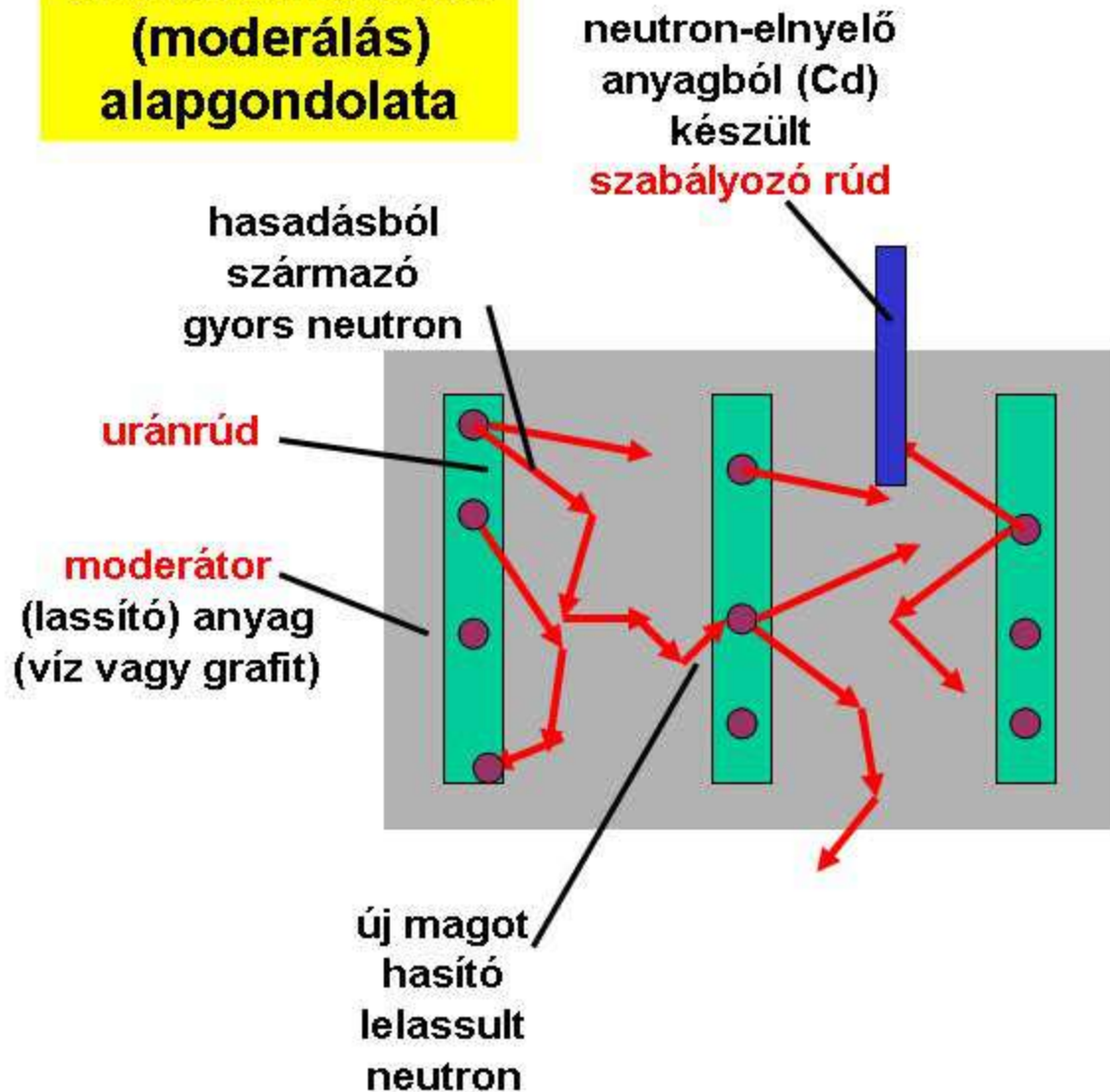
# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



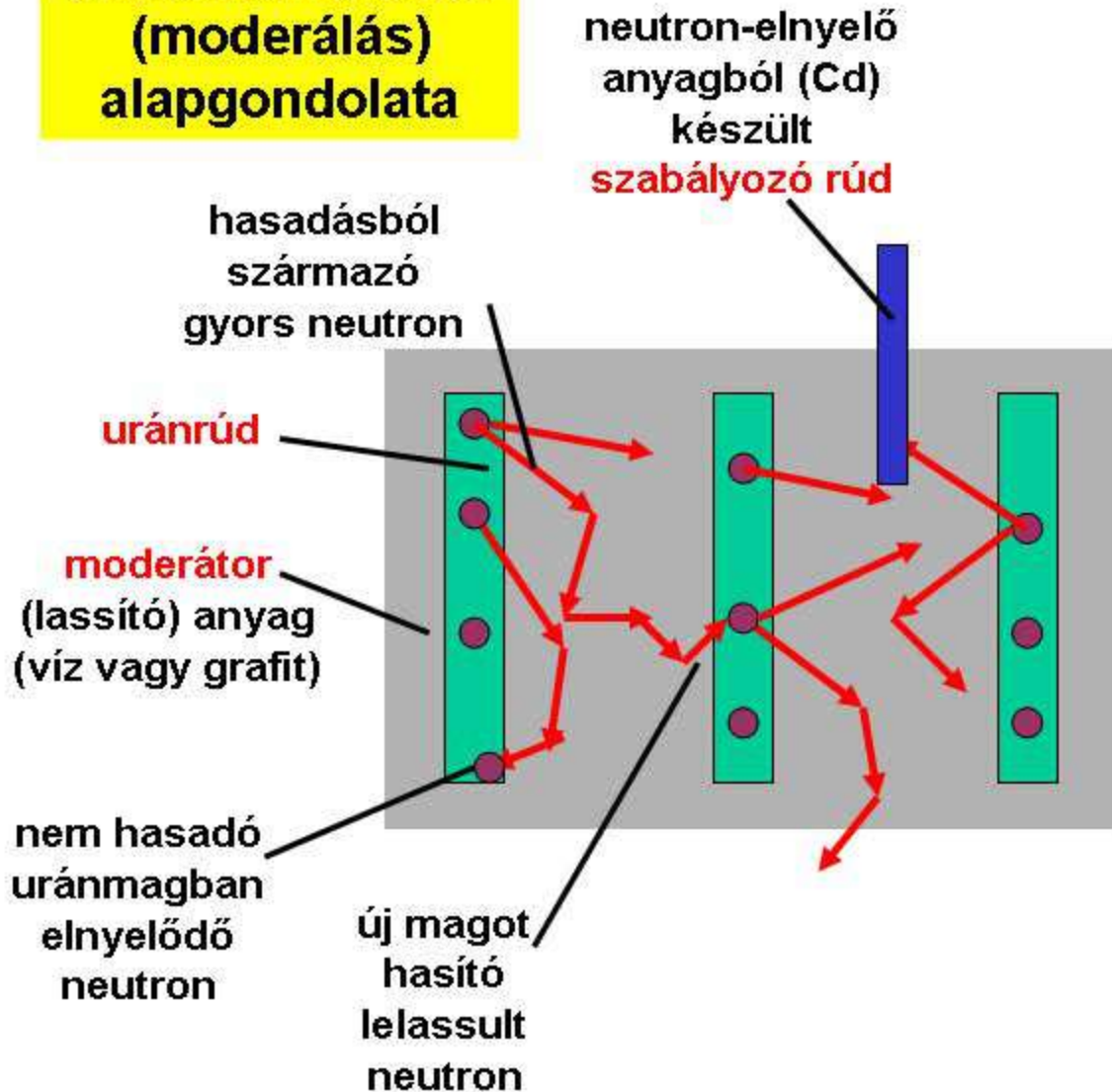
# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



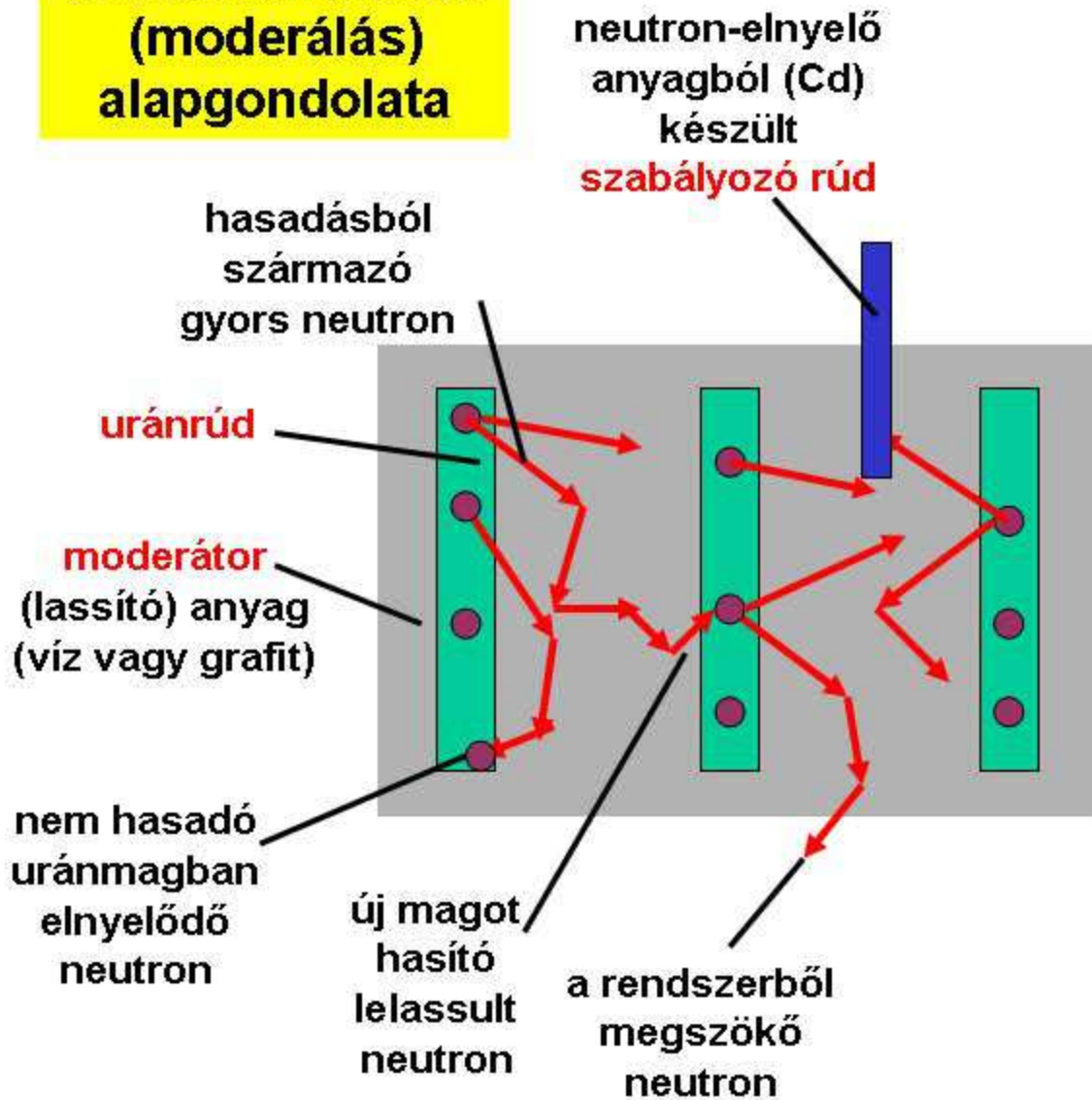
# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata

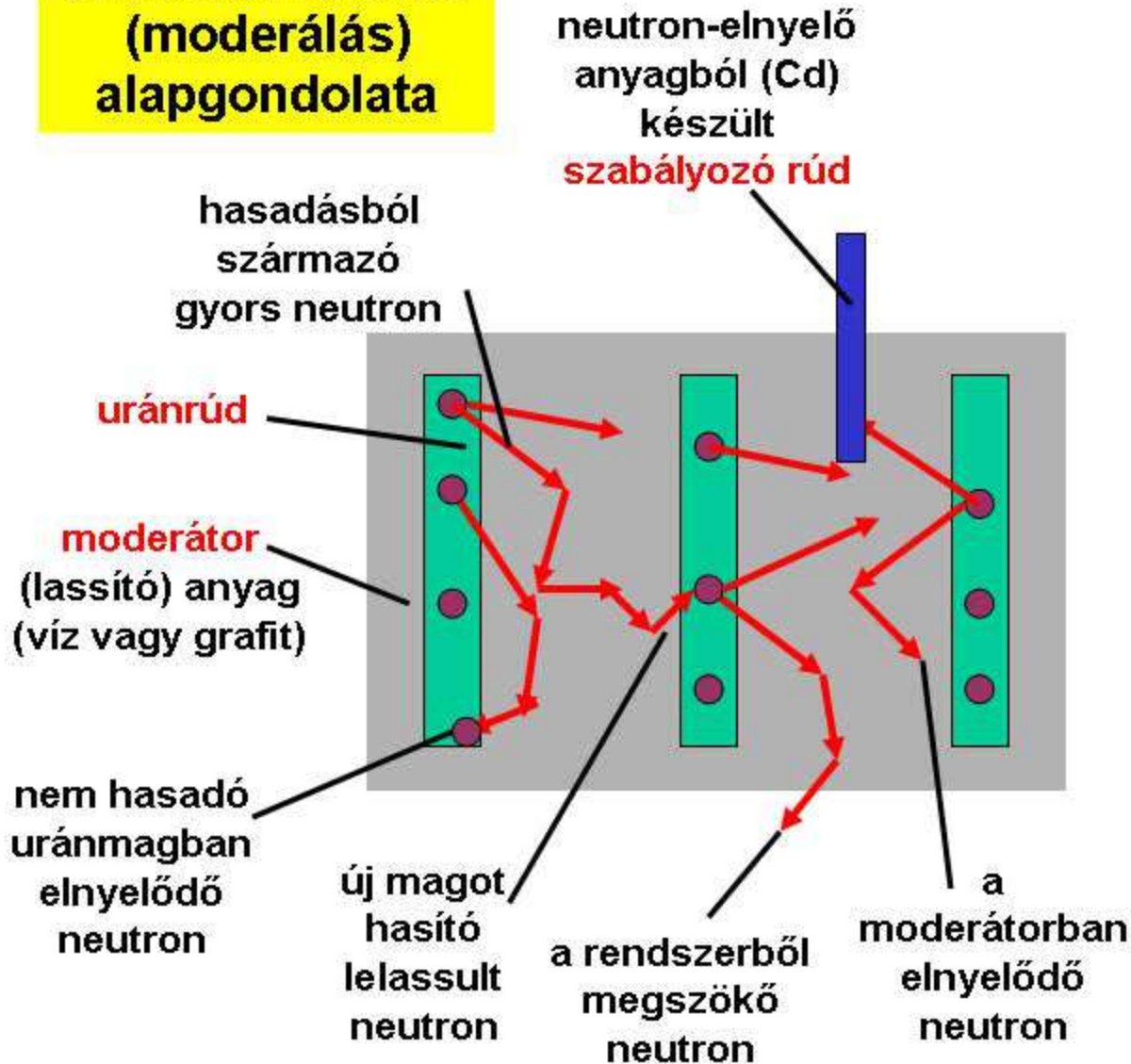


# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata

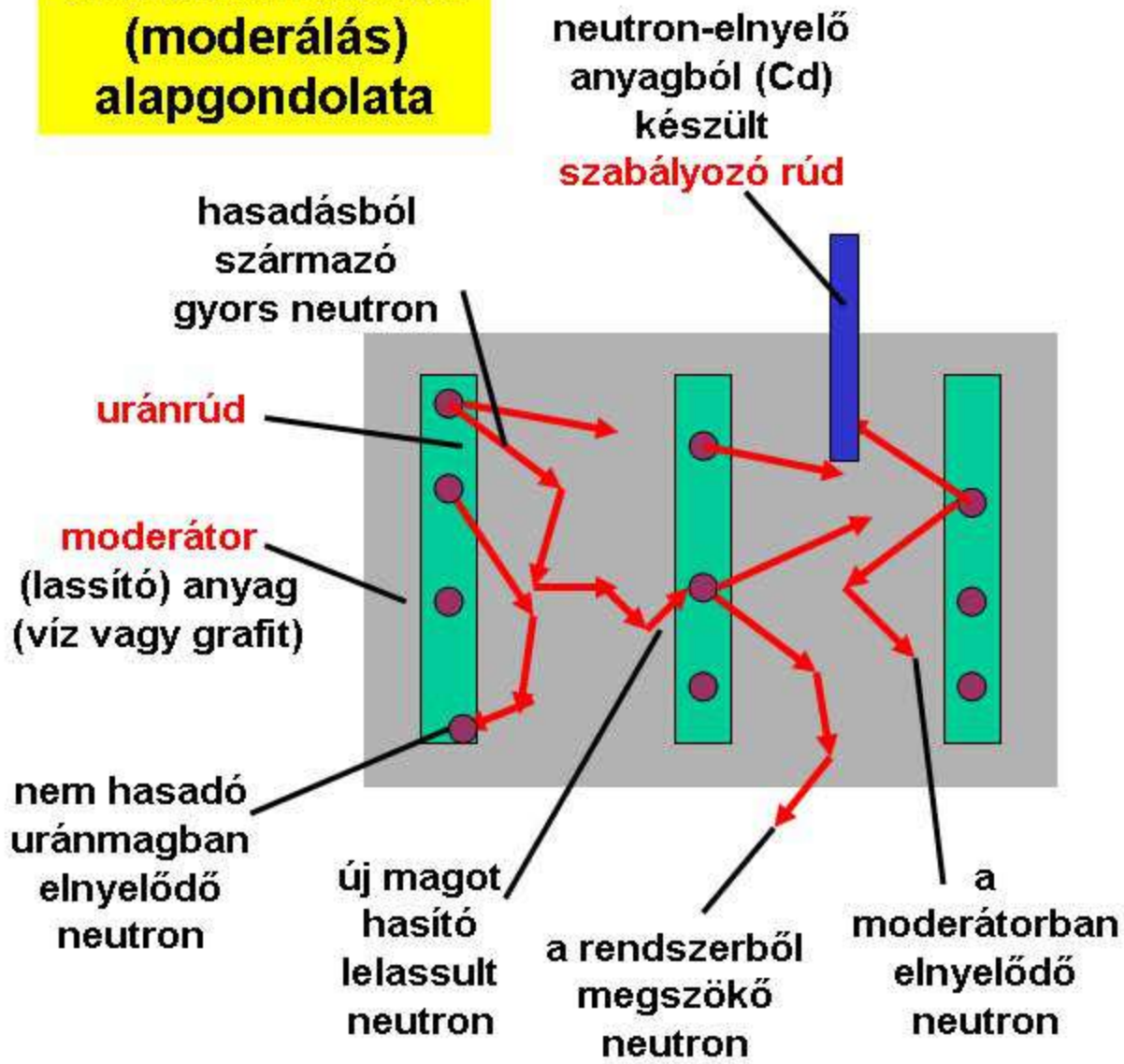




# a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



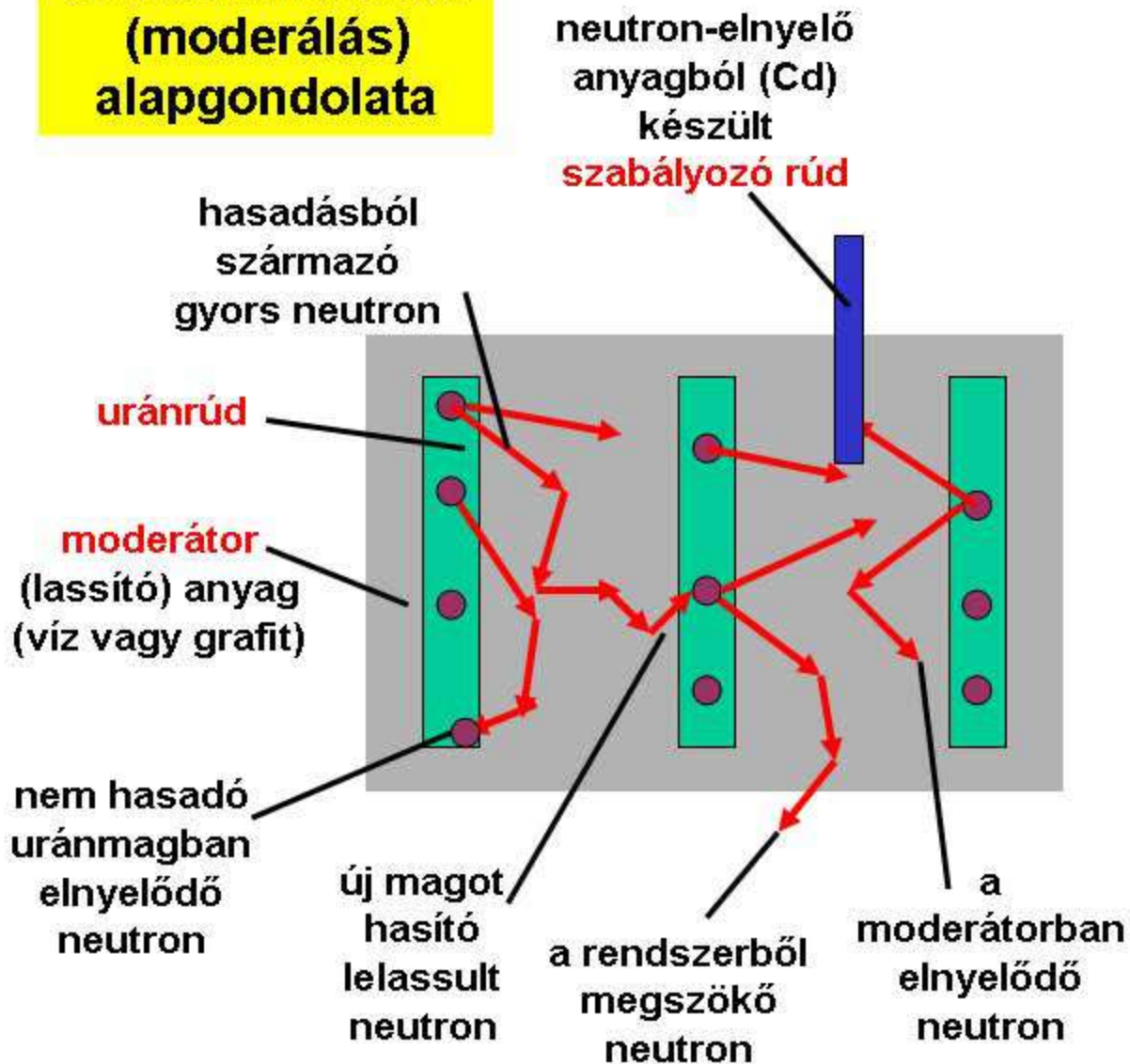
## a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



Ez a szerkezet az  
**atomreaktor**



## a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata

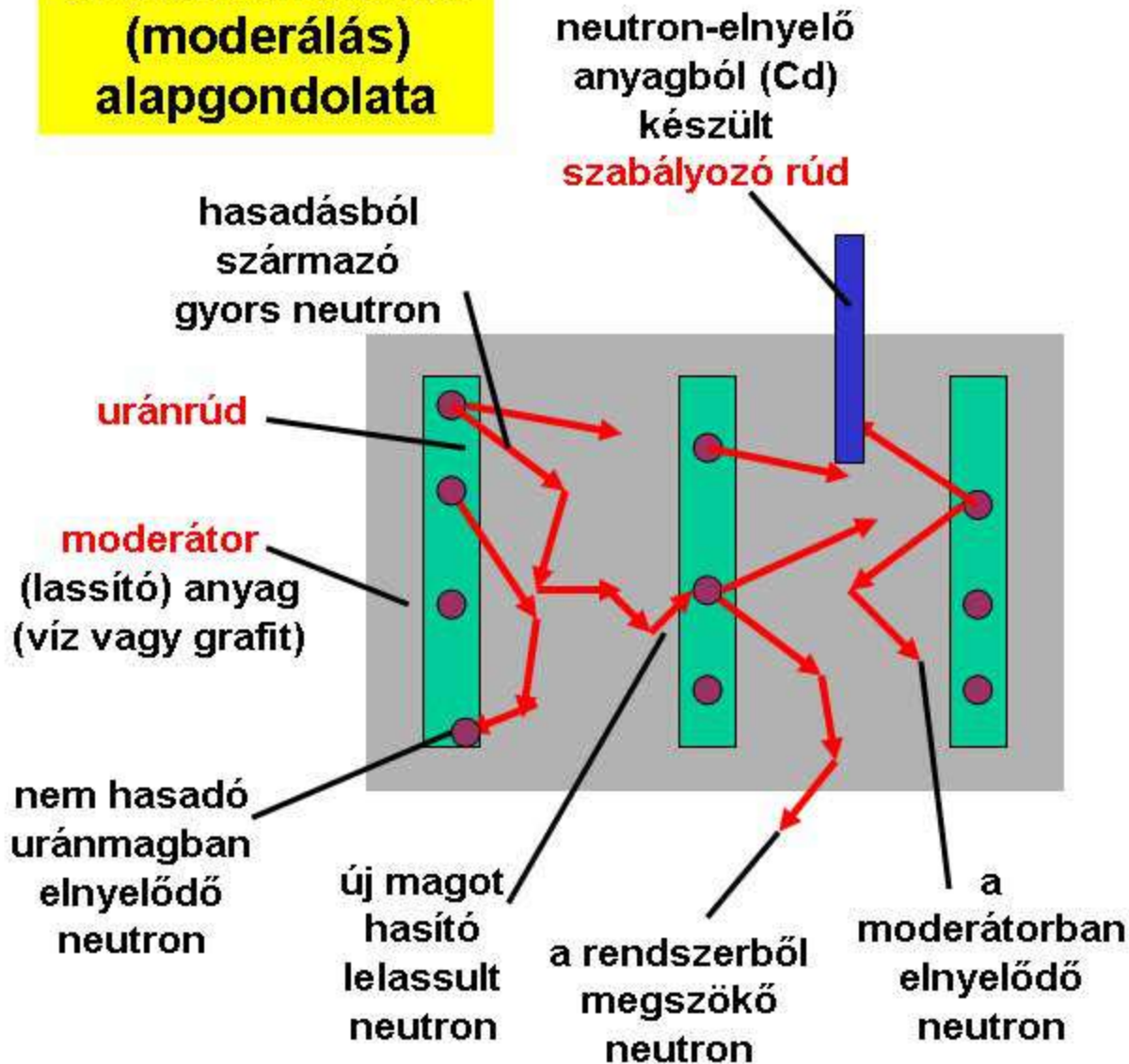


Ez a szerkezet az  
**atomreaktor**

egy neutron átlagosan  
egy új neutront kelt



## a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



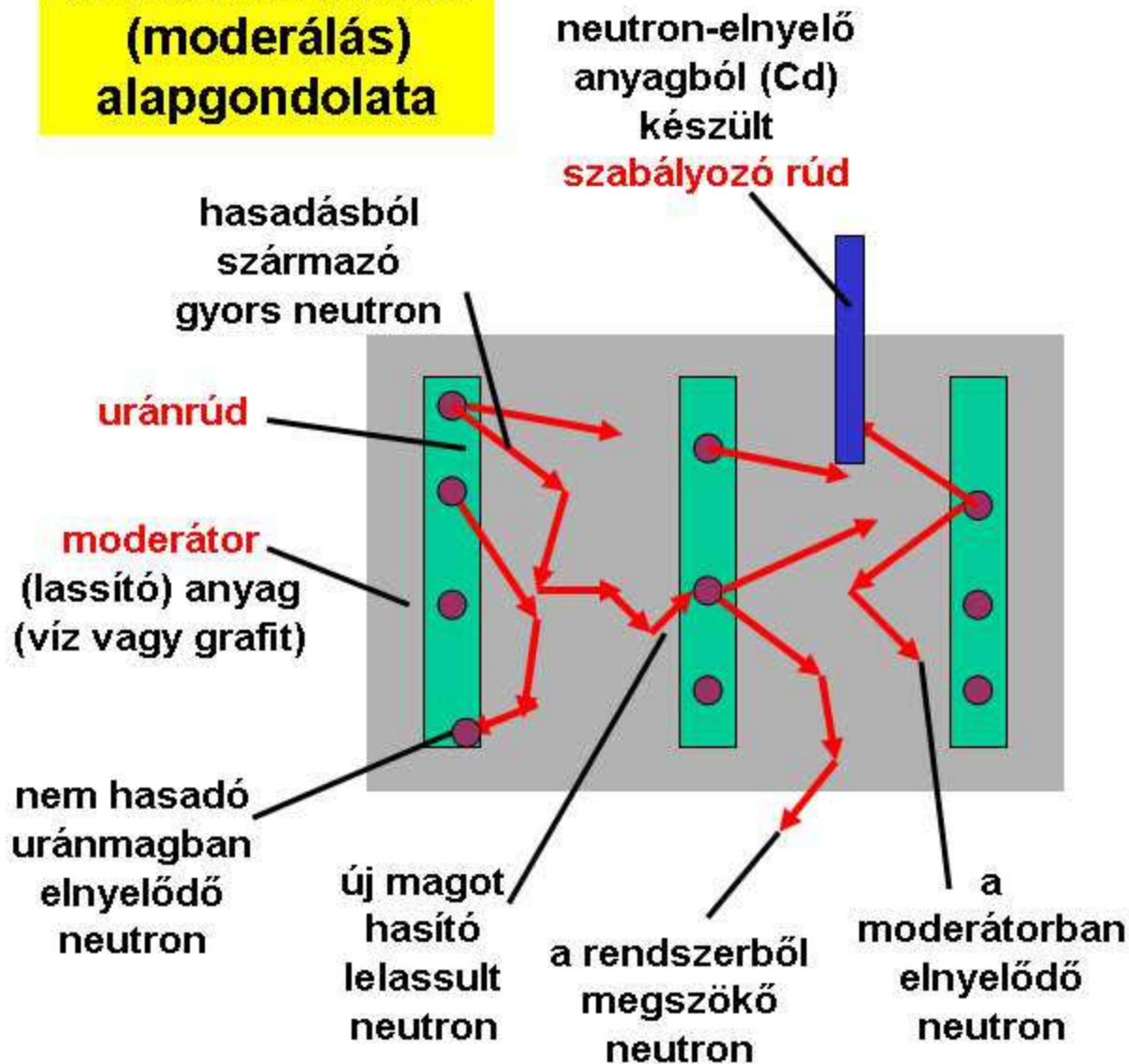
## Ez a szerkezet az atomreaktor

egy neutron átlagosan  
egy új neutront kelt

a rendszer  
állandósult  
üzemben működik



## a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



## Ez a szerkezet az atomreaktor

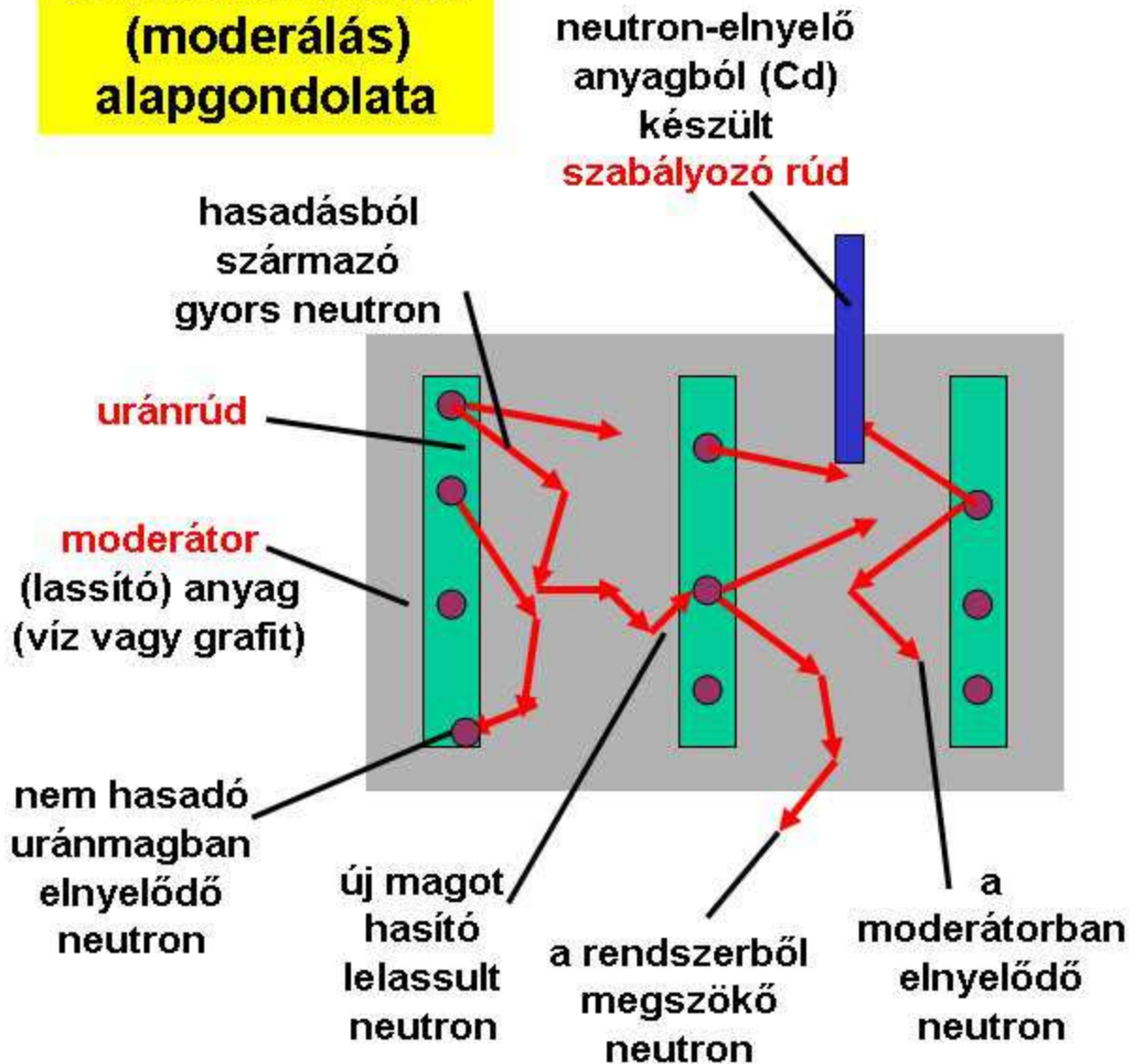
egy neutron átlagosan egy új neutront kelt

**a rendszer  
állandósult  
üzemben működik**

a lassú neutronok miatt nem kell annyira dúsítani az uránt (kb 20%), mint a bombához (80%)



## a neutronlassítás (moderálás) alapgondolata



## Ez a szerkezet az **atomreaktor**

egy neutron átlagosan  
egy új neutron kelt

**a rendszer  
állandósult  
üzemben működik**

a lassú neutronok  
miatt nem kell  
annyira dúsítani az  
uránt (kb 20%), mint  
a bombához (80%)

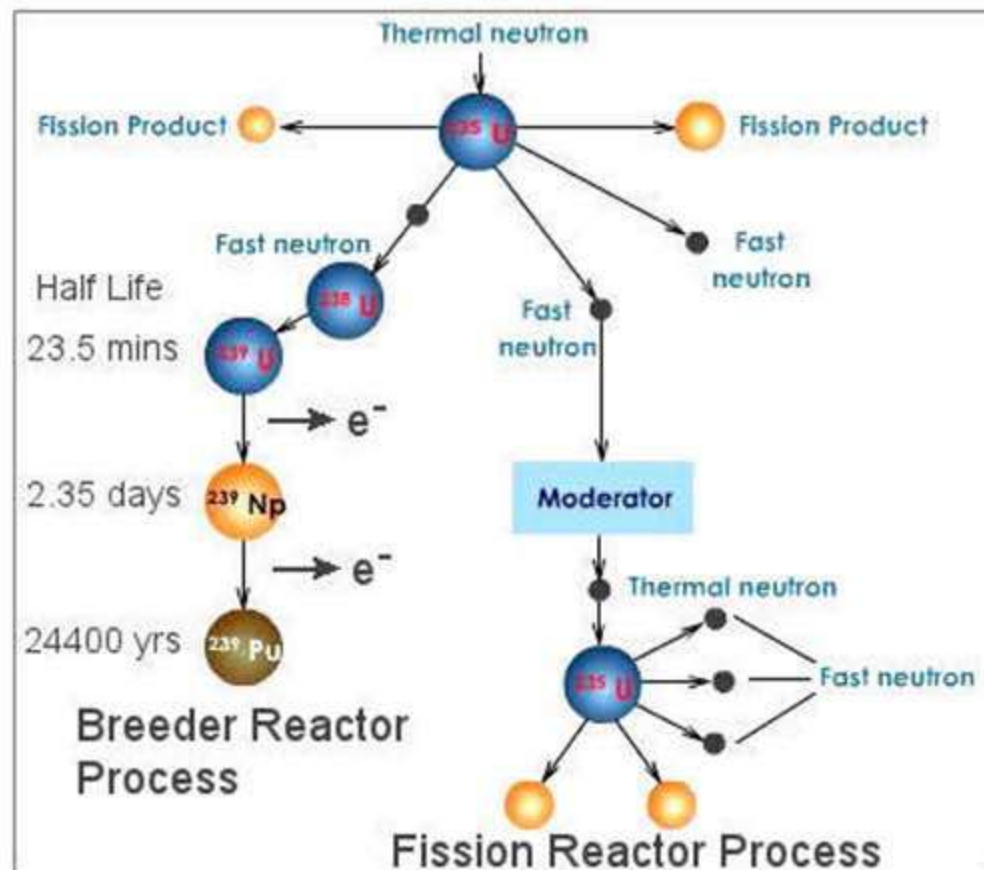
**Atomreaktorból  
sohasem lesz  
atombomba!**



# Különutas neutronok



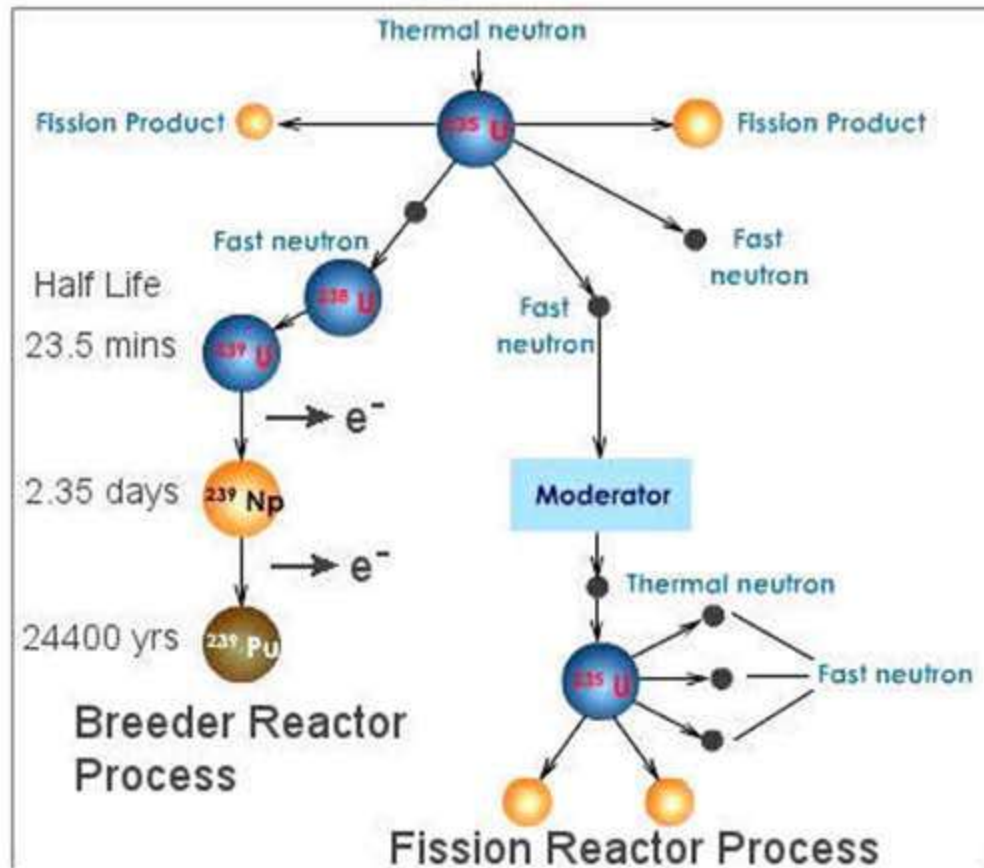
# Különutas neutronok





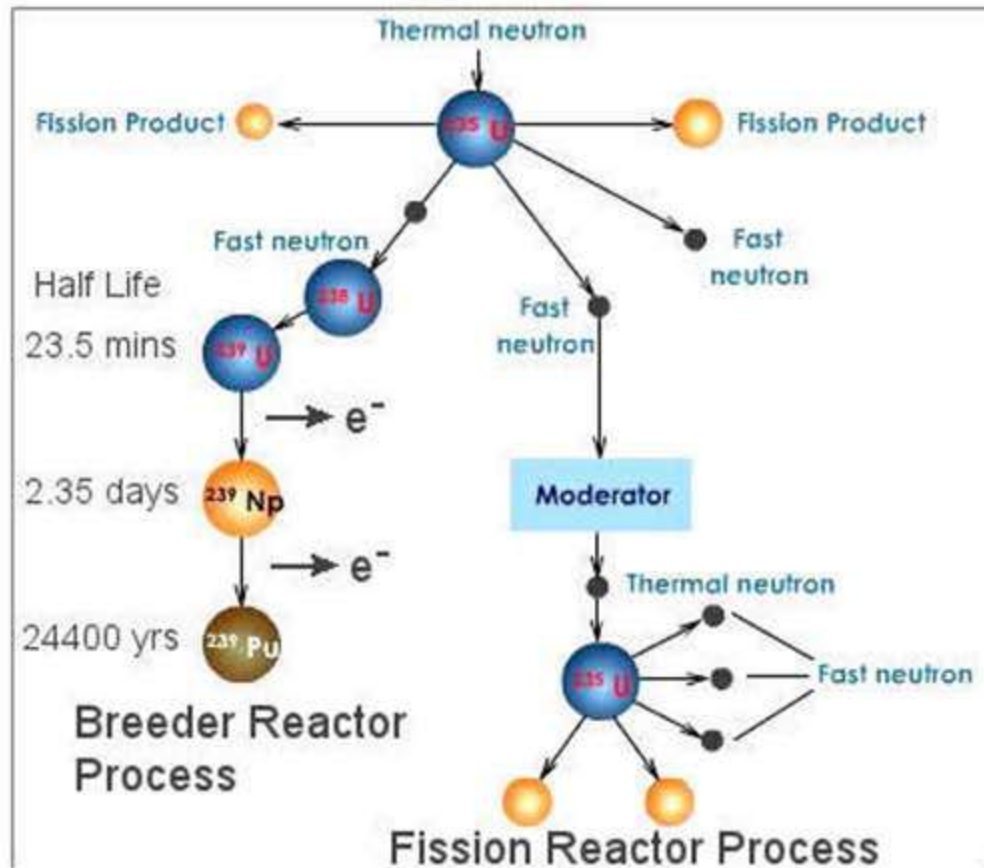
# Különutas neutronok

elnyelődnek  
a  $^{238}\text{U}$  magokban,



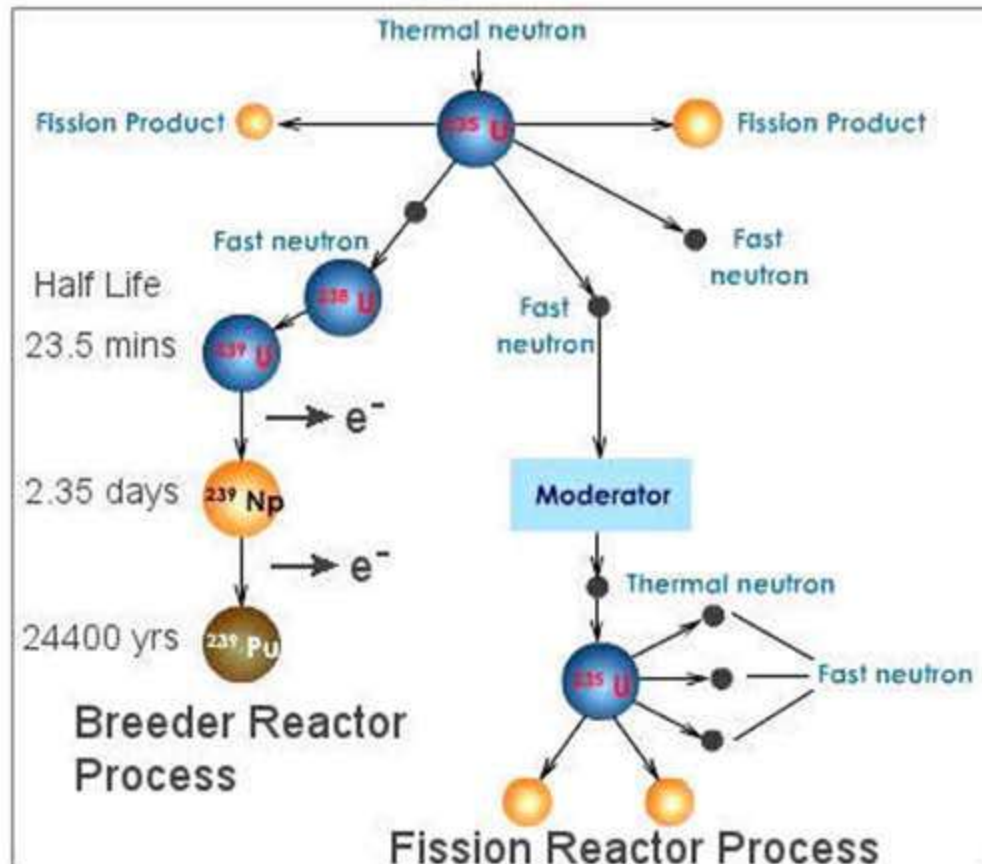
# Különutas neutronok

elnyelődnek  
a  $^{238}\text{U}$  magokban,  
és  $^{239}\text{Pu}$ -vá  
alakítják őket,



# Különutas neutronok

elnyelődnek a  $^{238}\text{U}$  magokban,  
és  $^{239}\text{Pu}$ -vá alakítják őket,  
ezek további hasadásra alkalmasak



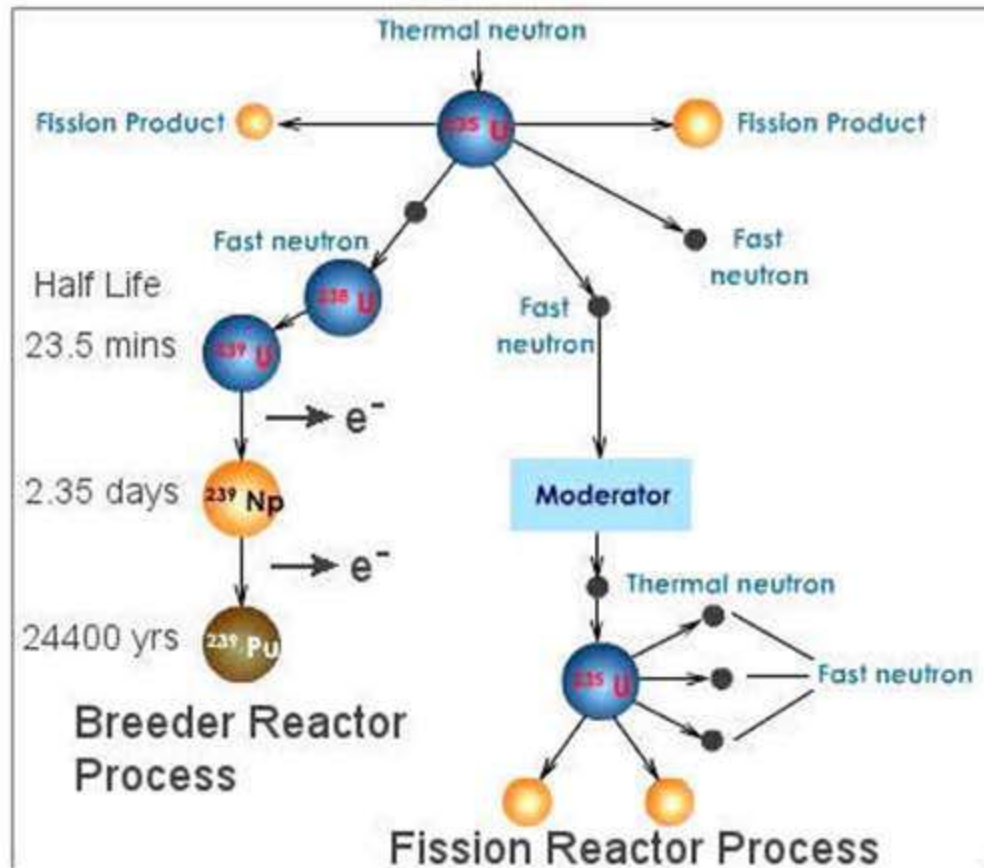
# Különutas neutronok

elnyelődnek a  $^{238}\text{U}$  magokban,

és  $^{239}\text{Pu}$ -vá alakítják őket,

ezek további hasadásra alkalmasak

– pl. atombombában



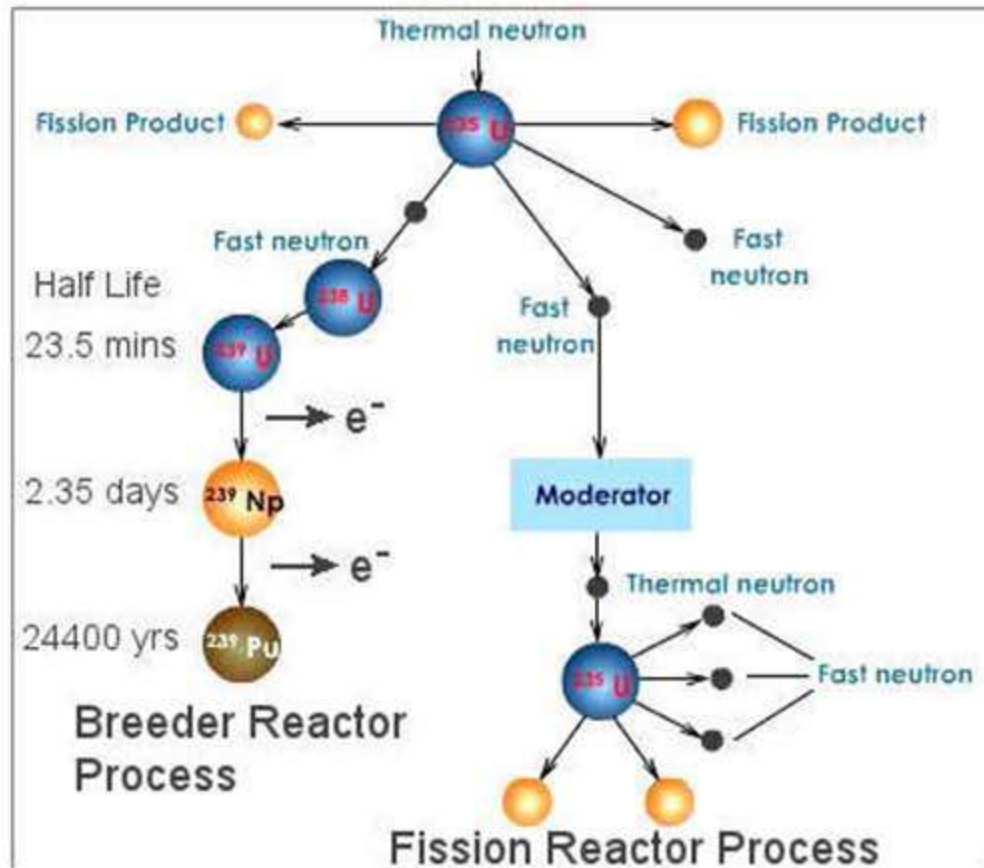
# Különutas neutronok

elnyelődnek a  $^{238}\text{U}$  magokban,

és  $^{239}\text{Pu}$ -vá alakítják őket,

ezek további hasadásra alkalmasak

– pl. atombombában



„szaporító reaktorok”

# Hová tesszük a felszabaduló magenergiát?



# Hová tesszük a felszabaduló magenergiát?

Lefelé a nukleáris völgyben – **energia szabadul fel**



## Hová tesszük a felszabaduló magenergiát?

Lefelé a nukleáris völgyben – **energia szabadul fel**

a résztvevő részecskék – magtörmelékek és  
neutronok – mozgási energiája formájában





## Hová tesszük a felszabaduló magenergiát?

Lefelé a nukleáris völgyben – **energia szabadul fel**

a résztvevő részecskék – magtörmelékek és neutronok – mozgási energiája formájában

Ez az energia **termalizálódik** – azaz eloszlik a környezetben: a környező anyag felmelegszik.



## Hová tesszük a felszabaduló magenergiát?

Lefelé a nukleáris völgyben – **energia szabadul fel**

a résztvevő részecskék – magtörmelékek és neutronok – mozgási energiája formájában

Ez az energia **termalizálódik** – azaz eloszlik a környezetben: a környező anyag felmelegszik.

A folyamat **stacionárius** – ezért a meleg anyag hőenergiáját folyamatosan el kell vezetni.



## Hová tesszük a felszabaduló magenergiát?

Lefelé a nukleáris völgyben – **energia szabadul fel**

a résztvevő részecskék – magtörmelékek és neutronok – mozgási energiája formájában

Ez az energia **termalizálódik** – azaz eloszlik a környezetben: a környező anyag felmelegszik.

A folyamat **stacionárius** – ezért a meleg anyag hőenergiáját folyamatosan el kell vezetni.

Erre szolgál a **HŐERŐMŰ**.



## Hová tesszük a felszabaduló magenergiát?

Lefelé a nukleáris völgyben – **energia szabadul fel**

a résztvevő részecskék – magtörmelékek és neutronok – mozgási energiája formájában

Ez az energia **termalizálódik** – azaz eloszlik a környezetben: a környező anyag felmelegszik.

A folyamat **stacionárius** – ezért a meleg anyag hőenergiáját folyamatosan el kell vezetni.

Erre szolgál a **HŐERŐMŰ**.

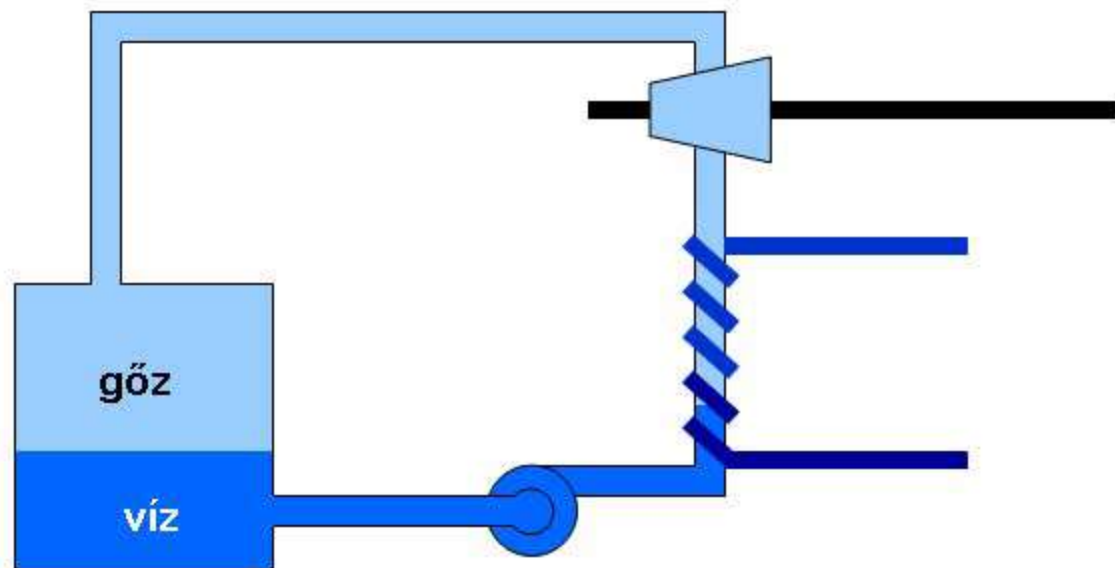
Az atomerőmű olyan hőerőmű, amelyben a hőt **nem kémiai reakció, hanem maghasadás** szolgáltatja. De a további folyamatok – **majdnem** – azonosak.



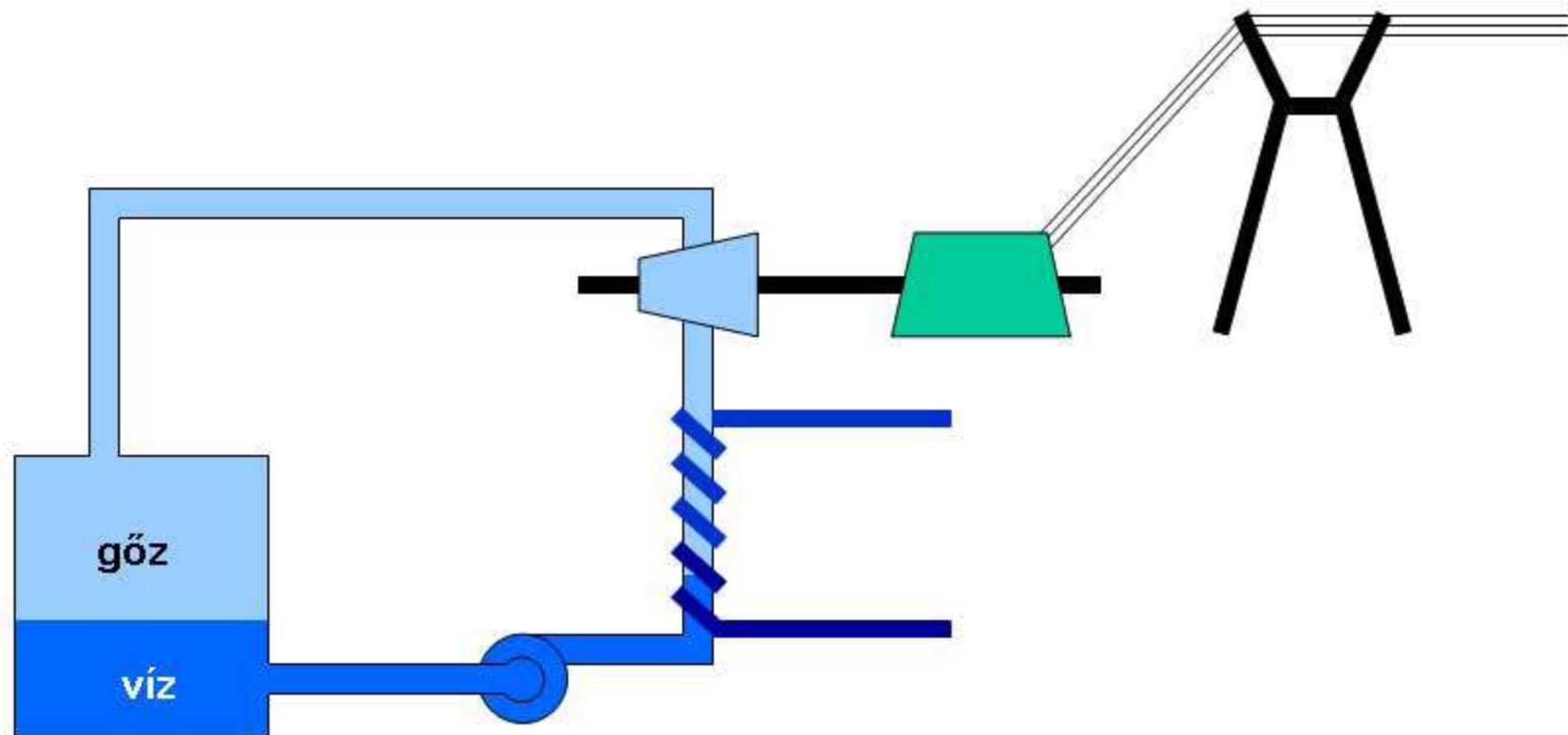
# Hőerőmű



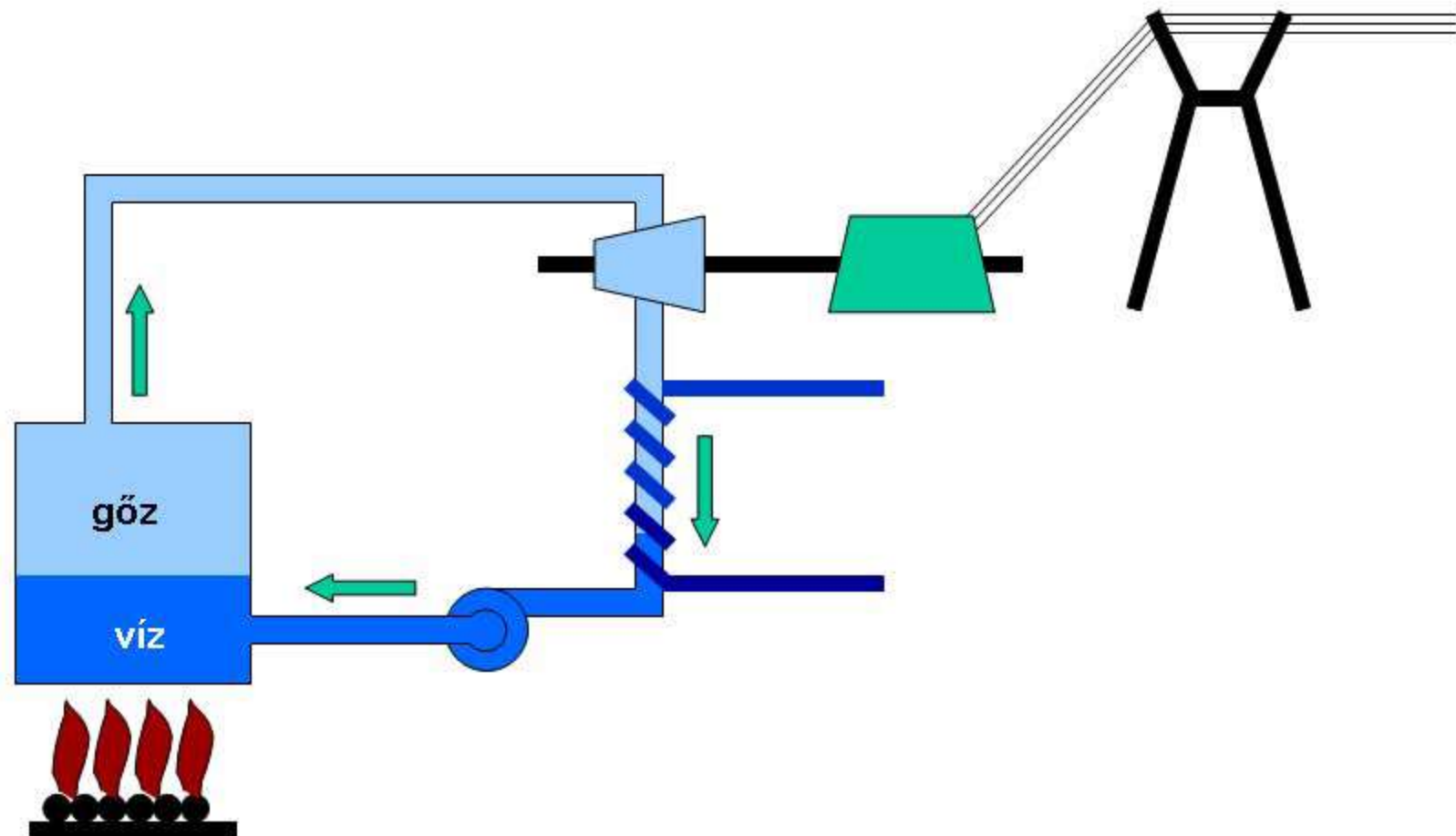
# Hőerőmű



# Hőerőmű

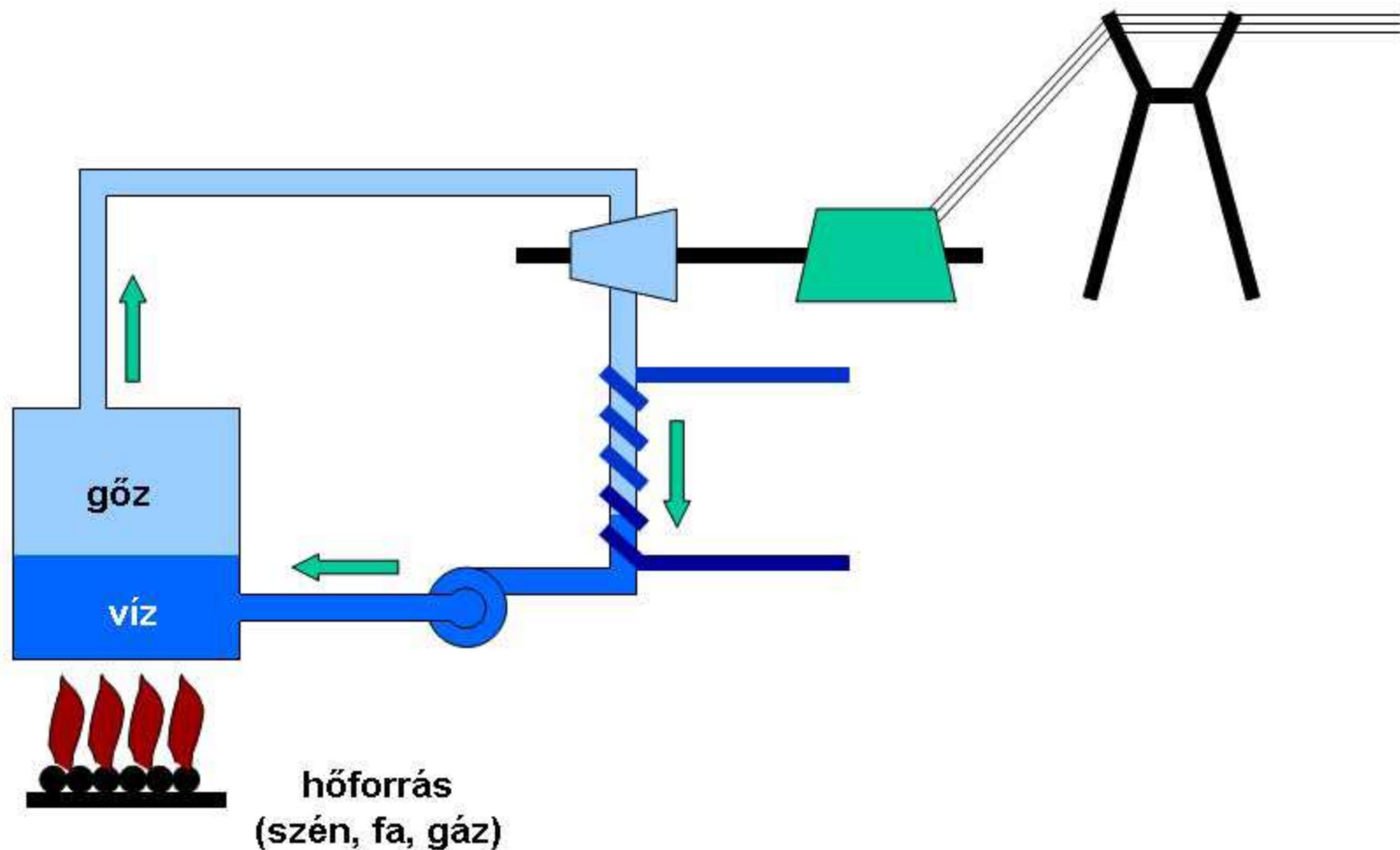


# Hőerőmű

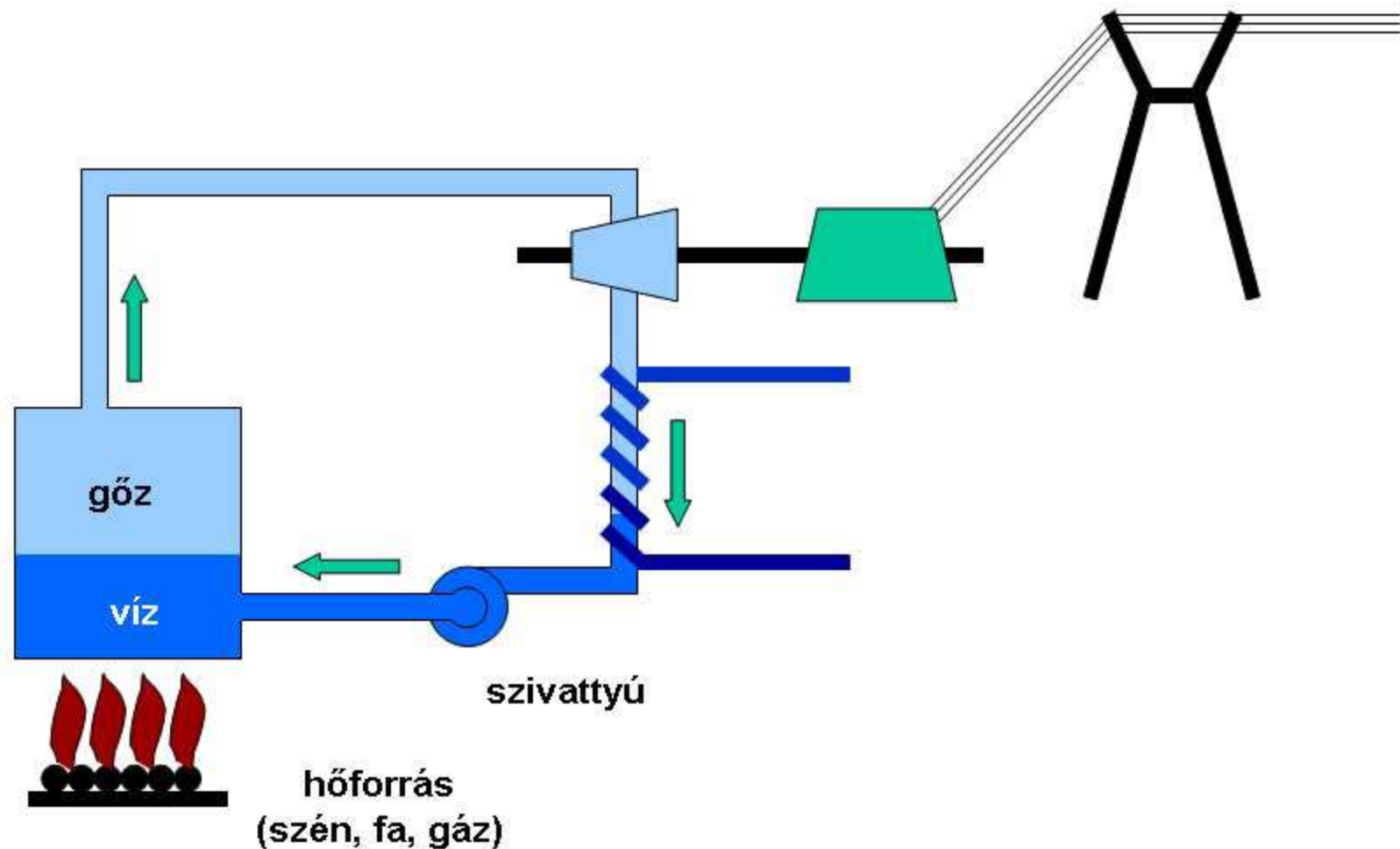




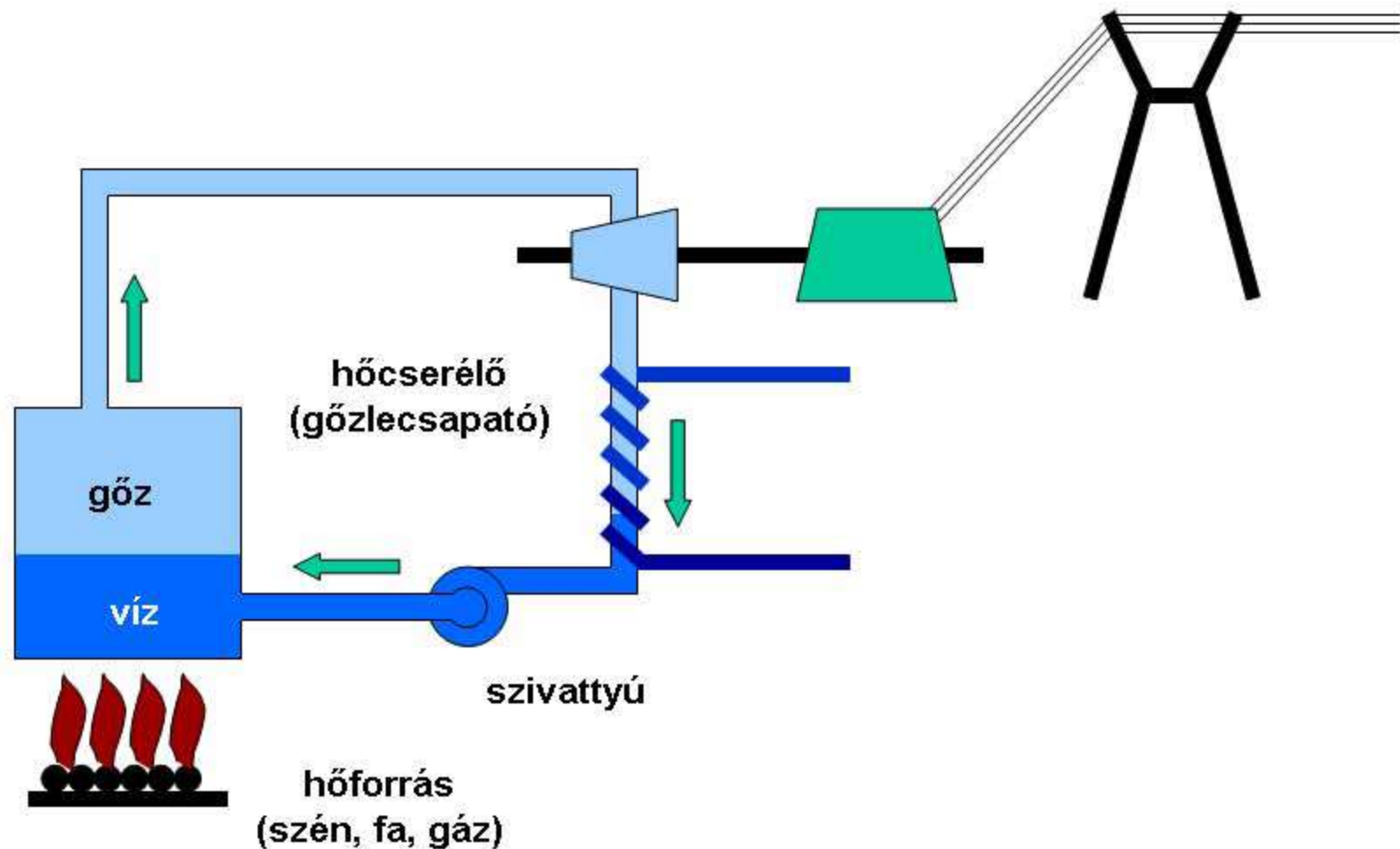
# Hőerőmű



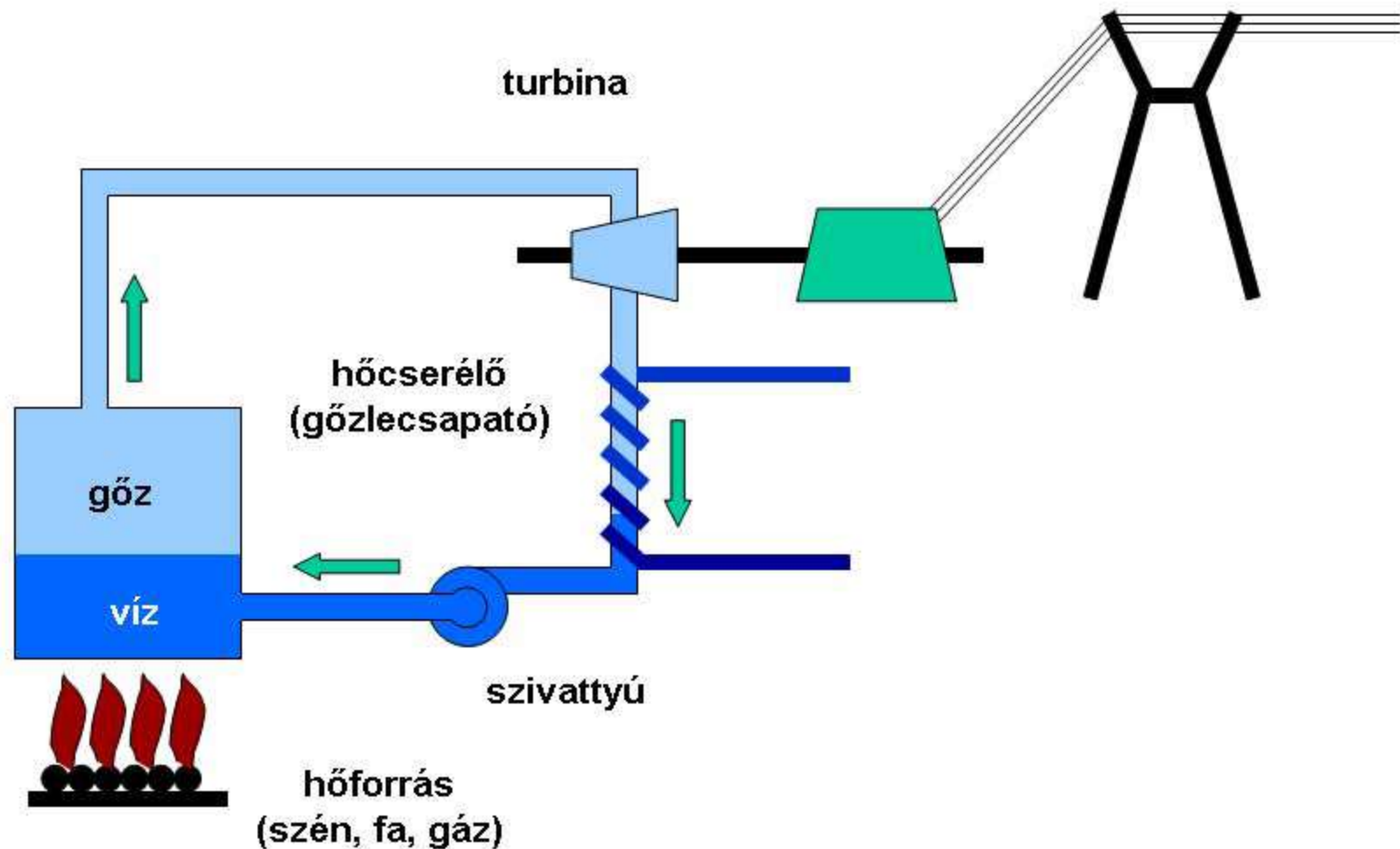
# Hőerőmű



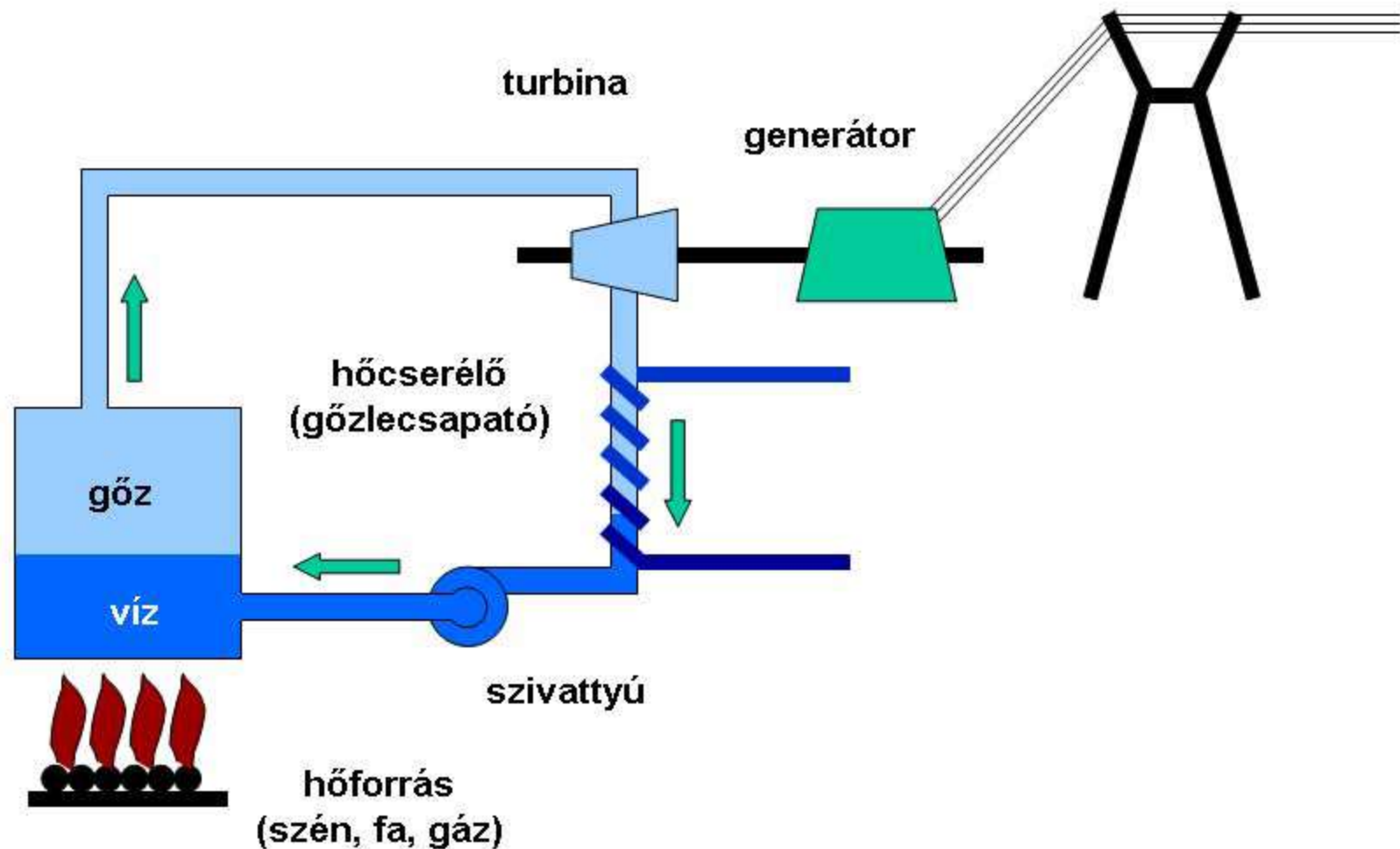
# Hőerőmű



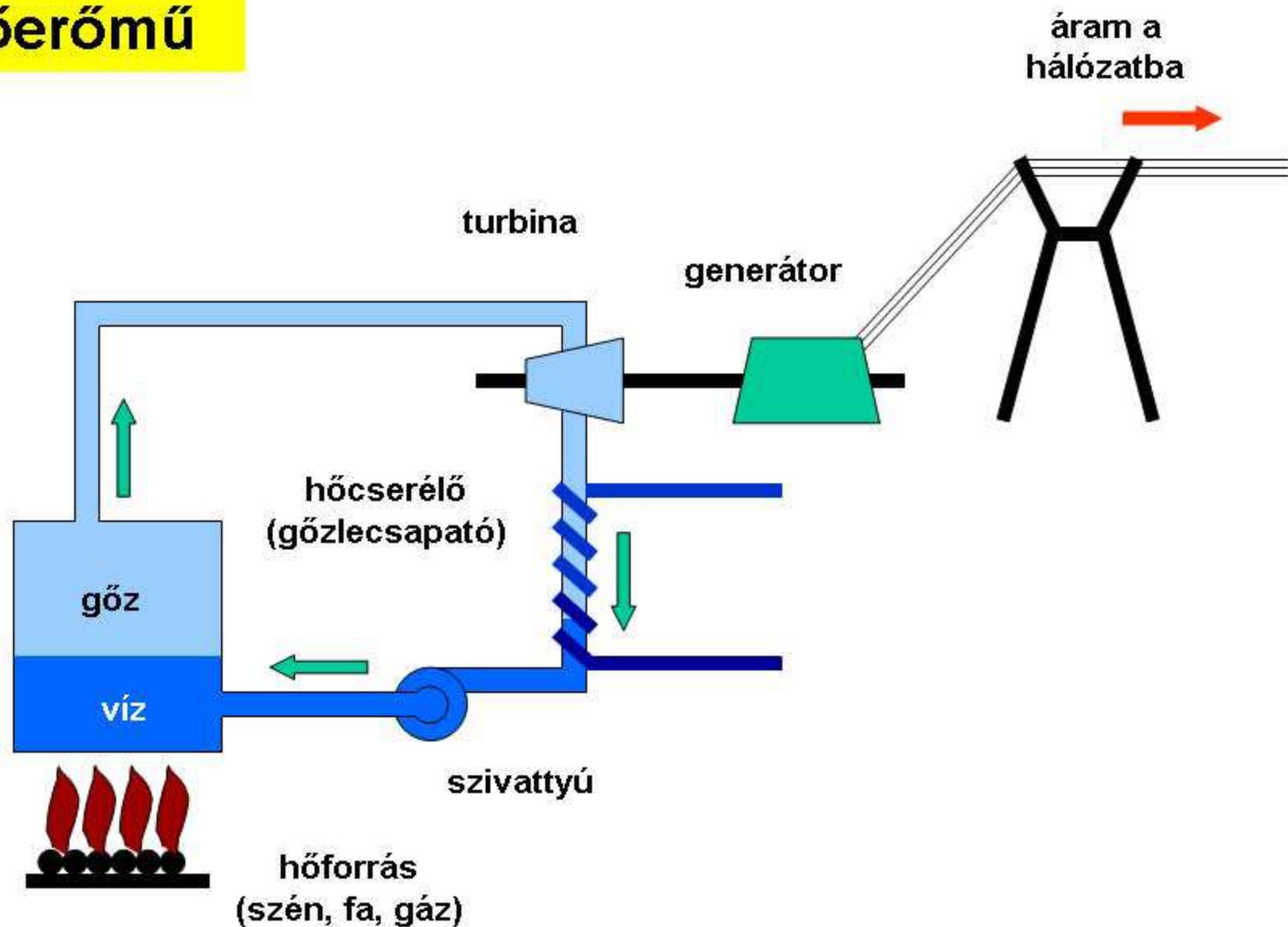
# Hőerőmű



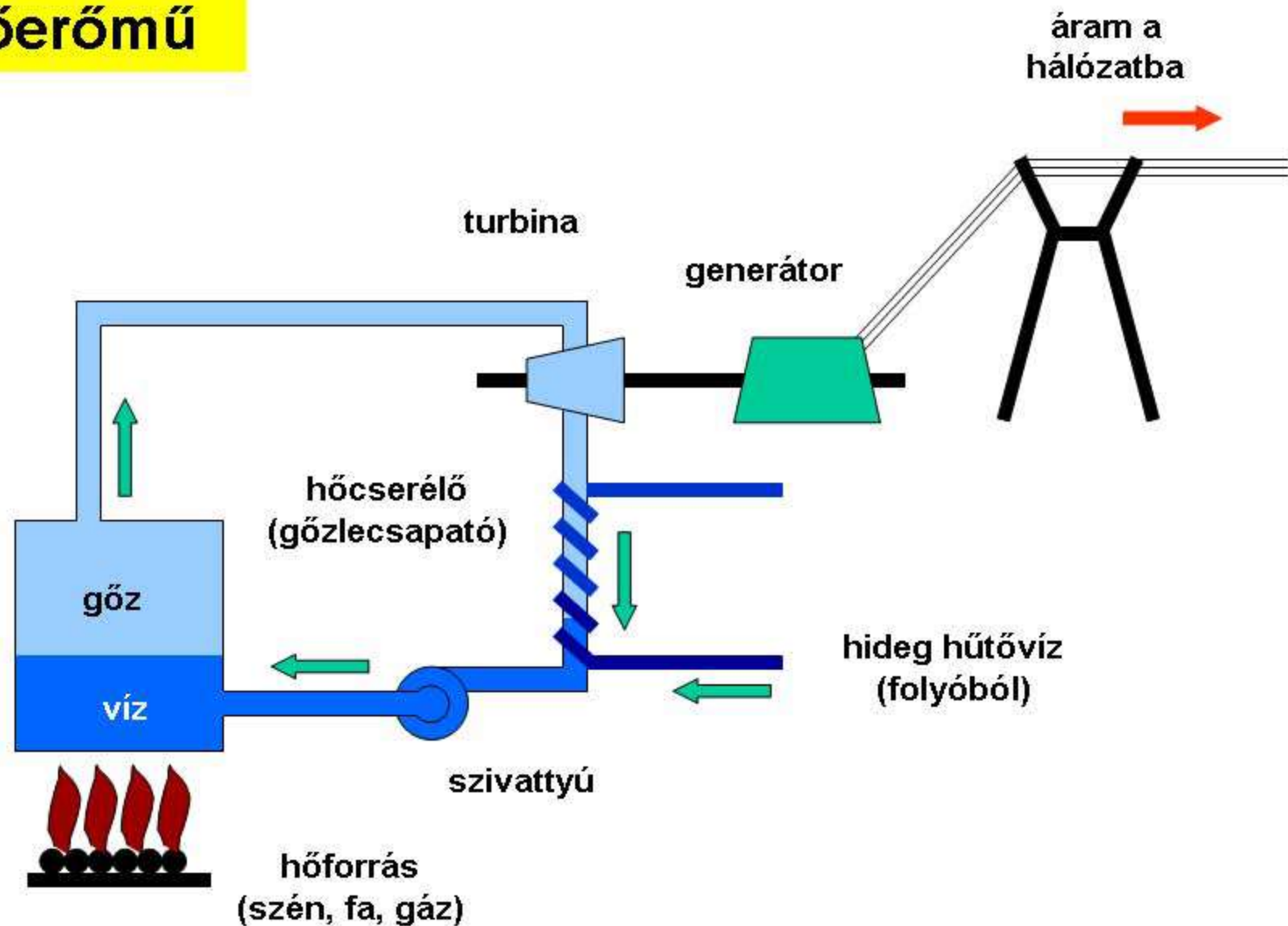
# Hőerőmű



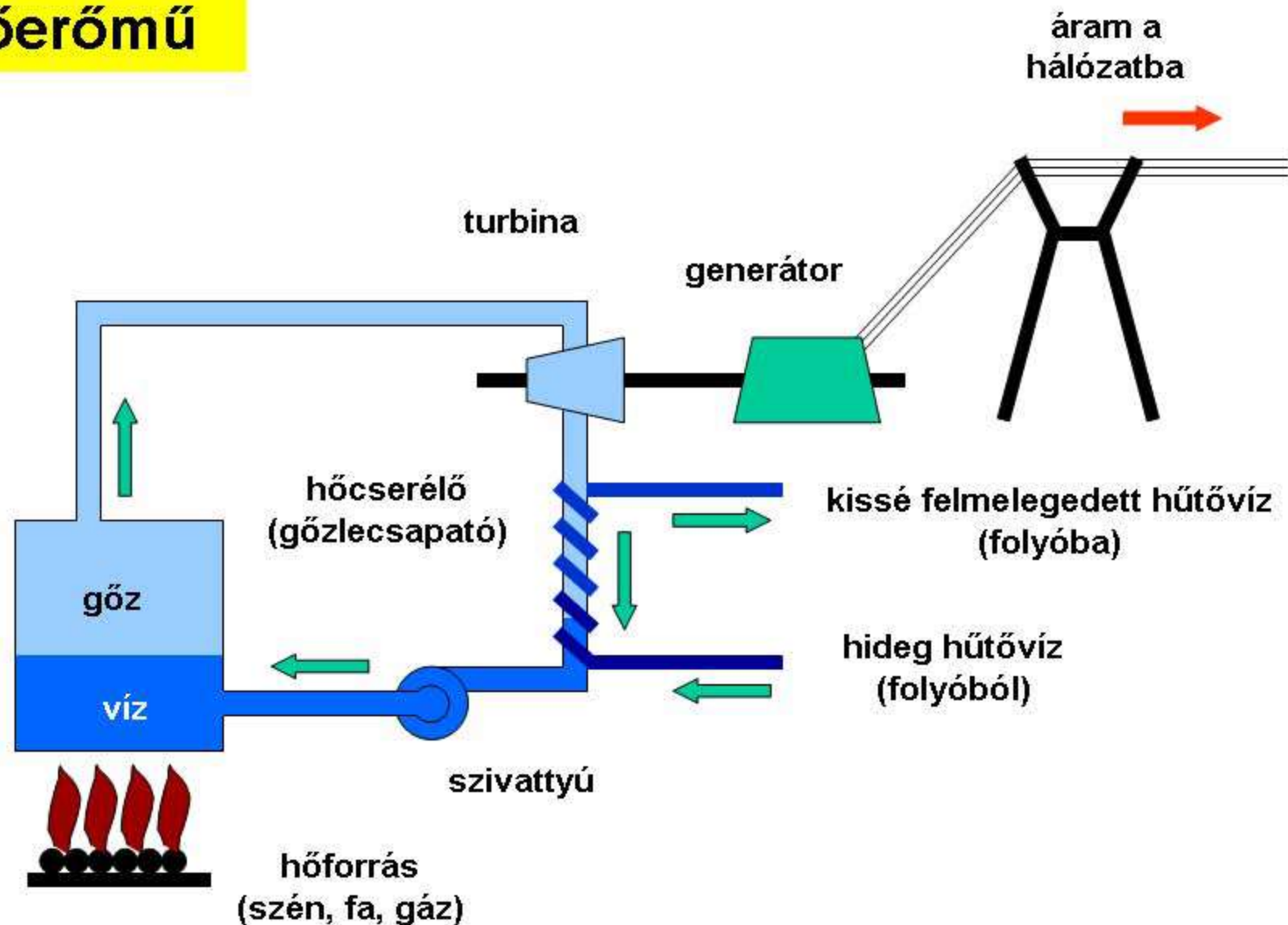
# Hőerőmű



# Hőerőmű



# Hőerőmű





# Atomerőmű



# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!



# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban  
**moderátorra** is szükség van!



# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban  
**moderátorra** is szükség van!



# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**), és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban **moderátorra** is szükség van!



# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban  
**moderátorra** is szükség van!



grafit

# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban  
**moderátorra** is szükség van!



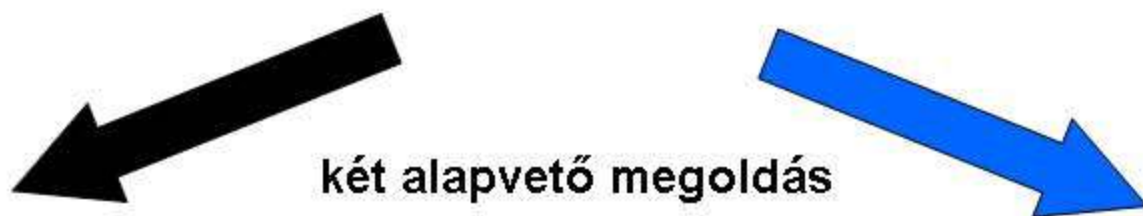
grafit

— szerkezeti anyag

# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban  
**moderátorra** is szükség van!



grafit

szerkezeti anyag

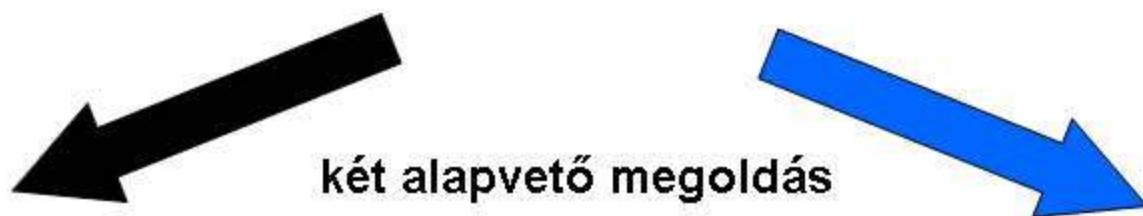
**moderátor**



# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban  
**moderátorra** is szükség van!



grafit

szerkezeti anyag

**moderátor**

víz

hűtőközeg



# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**), és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban **moderátorra** is szükség van!

két alapvető megoldás

grafit

szerkezeti anyag

**moderátor**

víz

hűtőközeg

víz



# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban  
**moderátorra** is szükség van!

két alapvető megoldás

grafit

szerkezeti anyag

moderátor

víz

hűtőközeg

víz

moderátor

# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**), és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban **moderátorra** is szükség van!

két alapvető megoldás

grafit

szerkezeti anyag

moderátor

víz

hűtőközeg

víz

moderátor

hűtőközeg

# Atomerőmű

Cseréljük ki a hőforrást atomreaktorra (**szabályozott láncreakcióra**),  
és vezessük el a hőt vízzel, éppen úgy, mint a hagyományos hőerőműben!

DE az atomreaktorban  
**moderátorra** is szükség van!

két alapvető megoldás

grafit

szerkezeti anyag

moderátor

víz

hűtőközeg

víz

moderátor

hűtőközeg

acéltartály

szerkezeti anyag



# Grafitmoderátoros erőmű



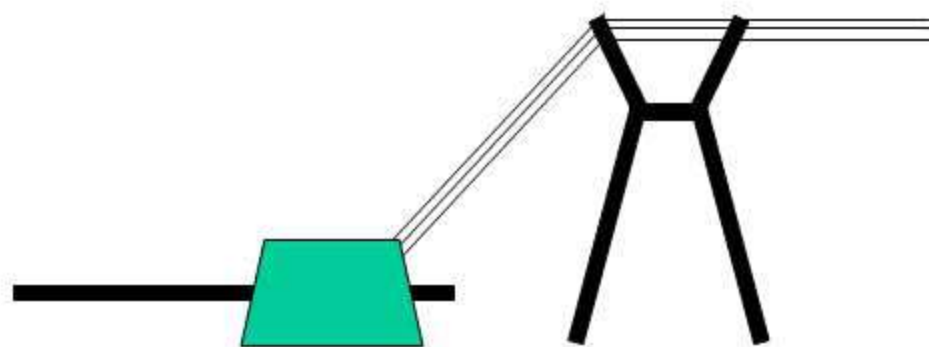
# Grafitmoderátoros erőmű

(Csernobil)

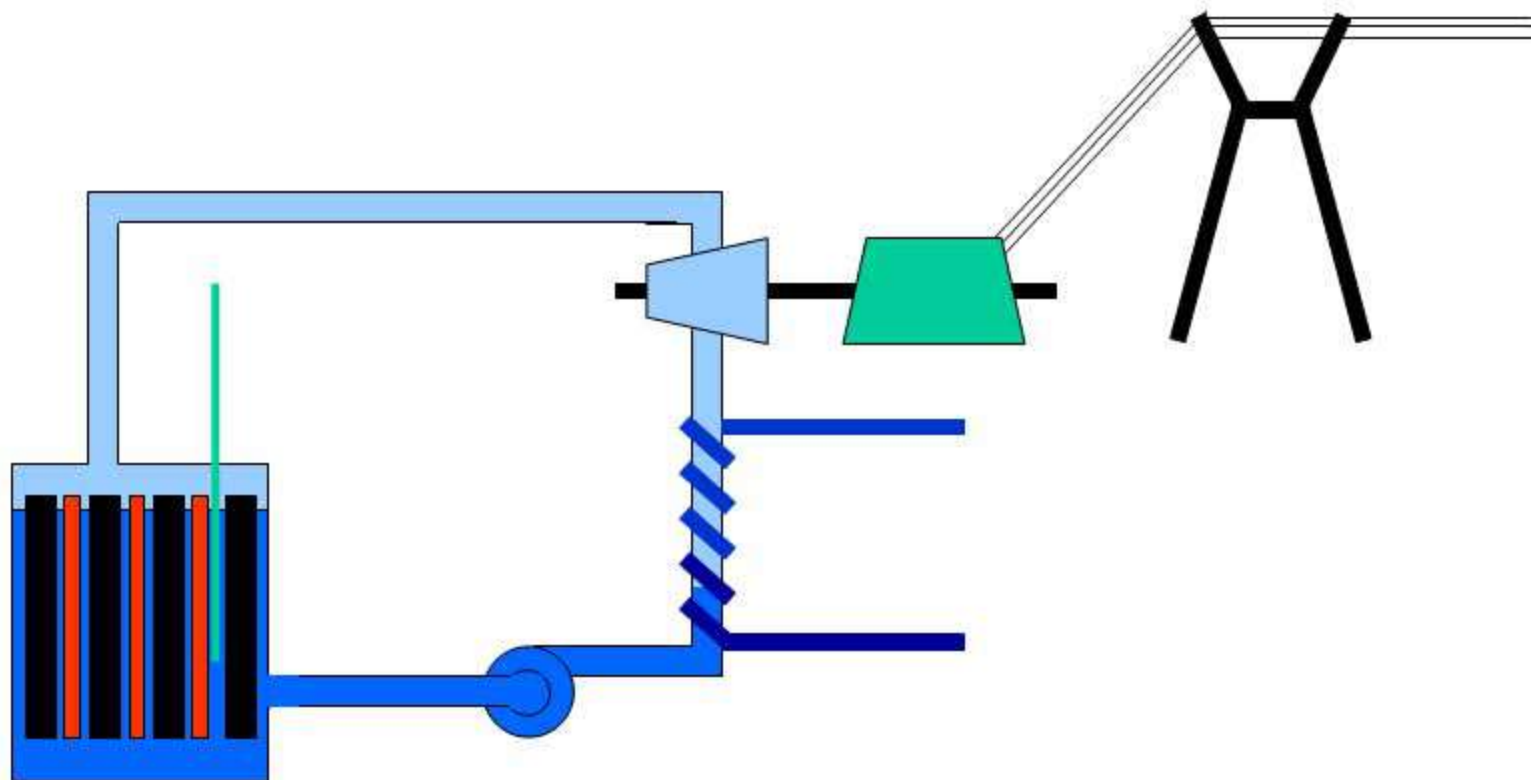


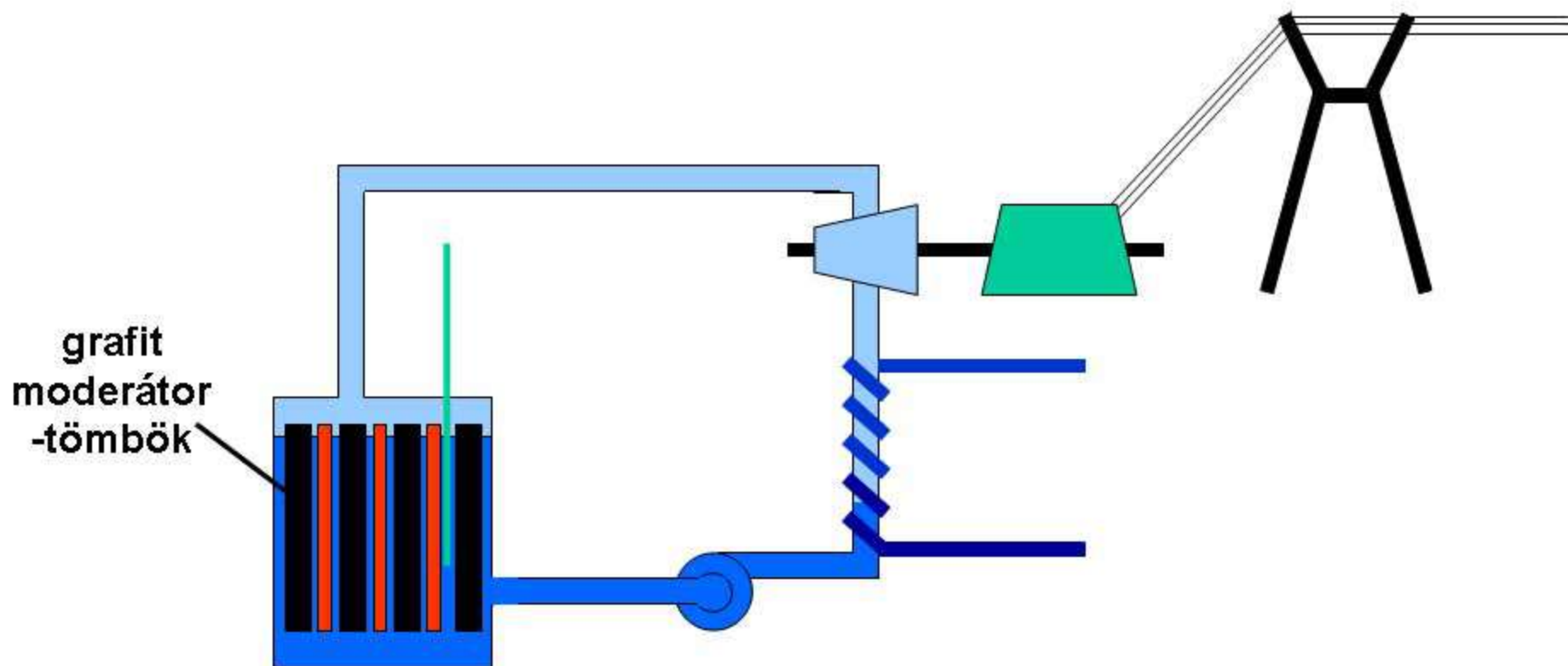
# Grafitmoderátoros erőmű

(Csernobil)



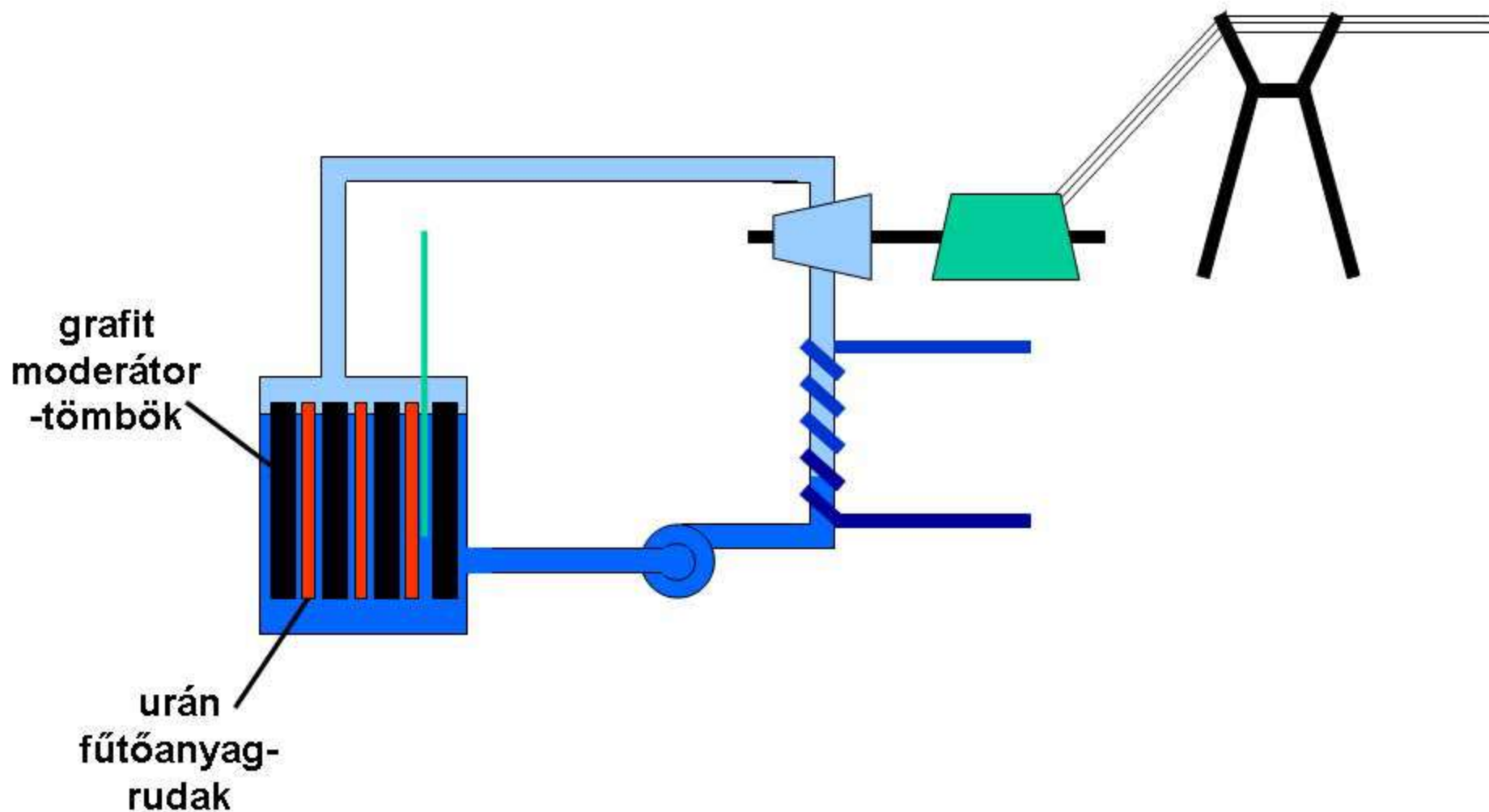






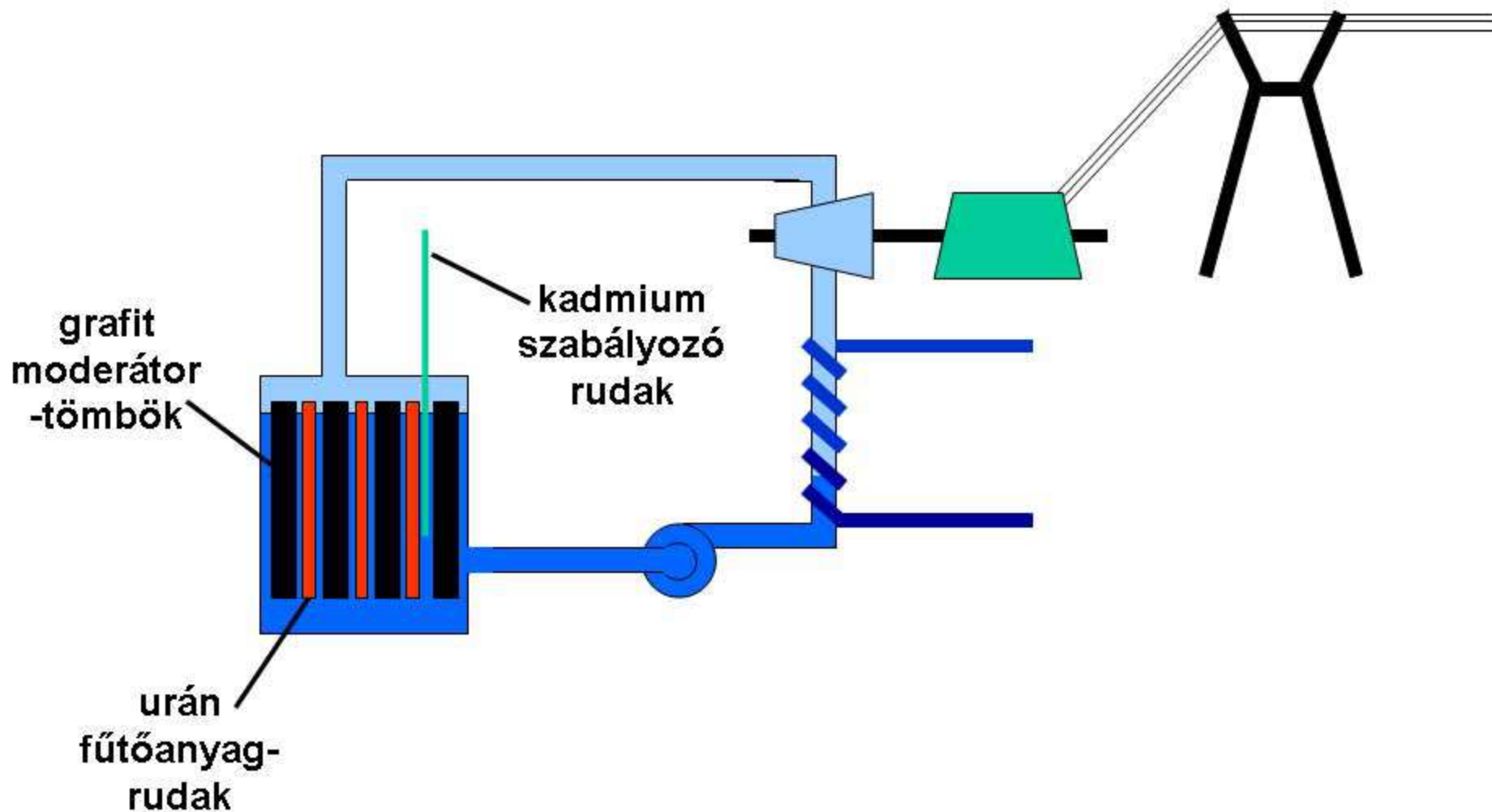
# Grafitmoderátoros erőmű

(Csernobil)



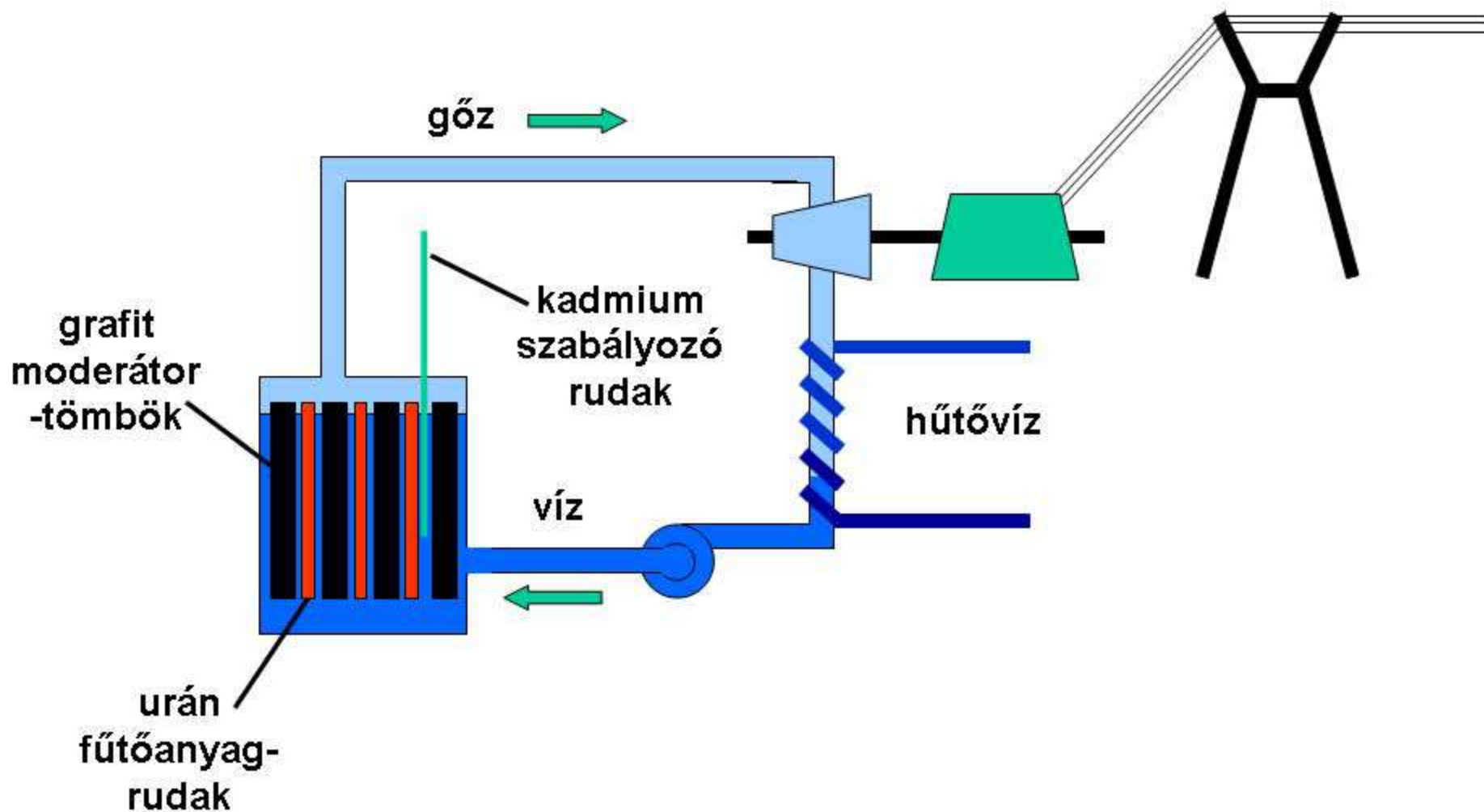
# Grafitmoderátoros erőmű

(Csernobil)



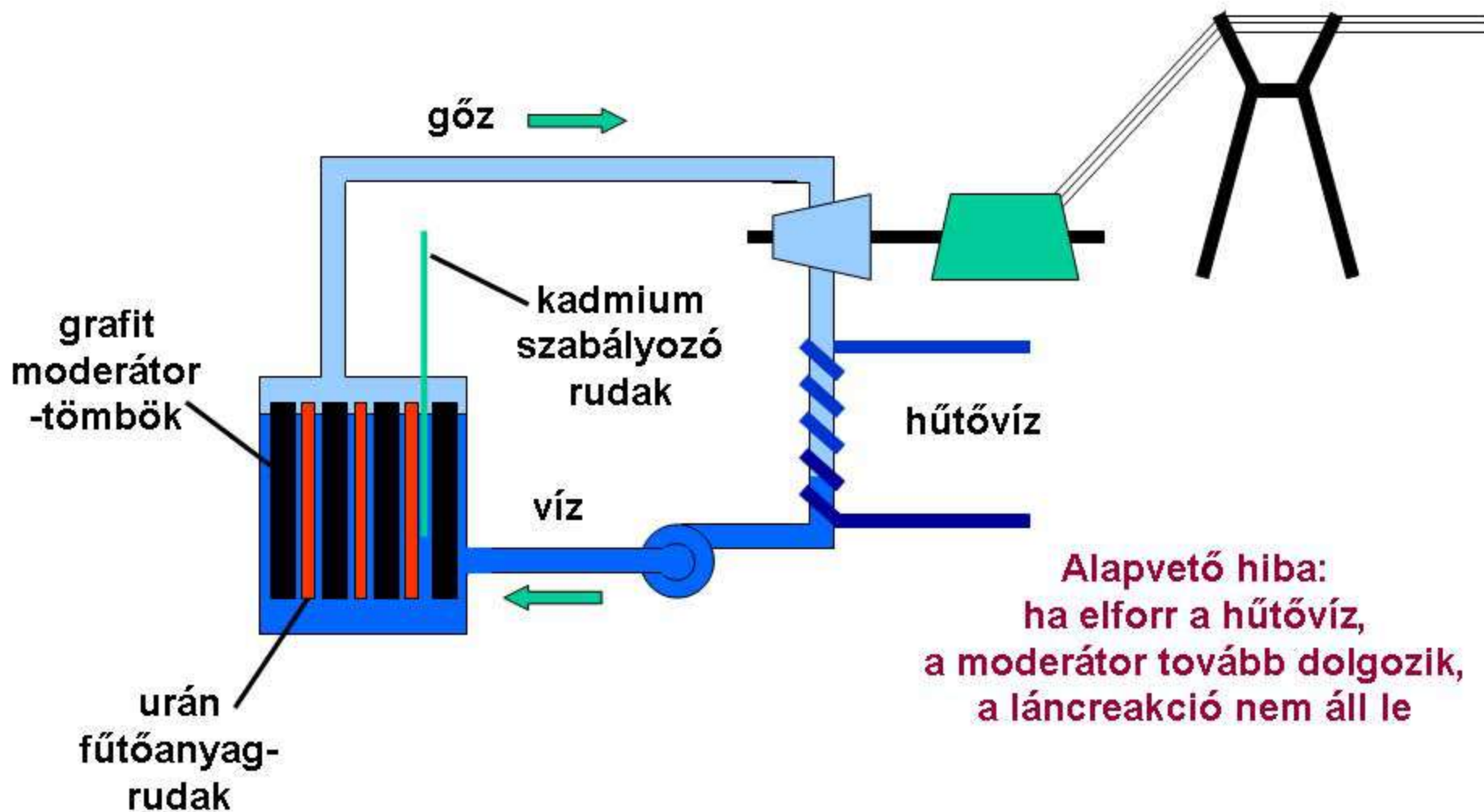
# Grafitmoderátoros erőmű

(Csernobil)



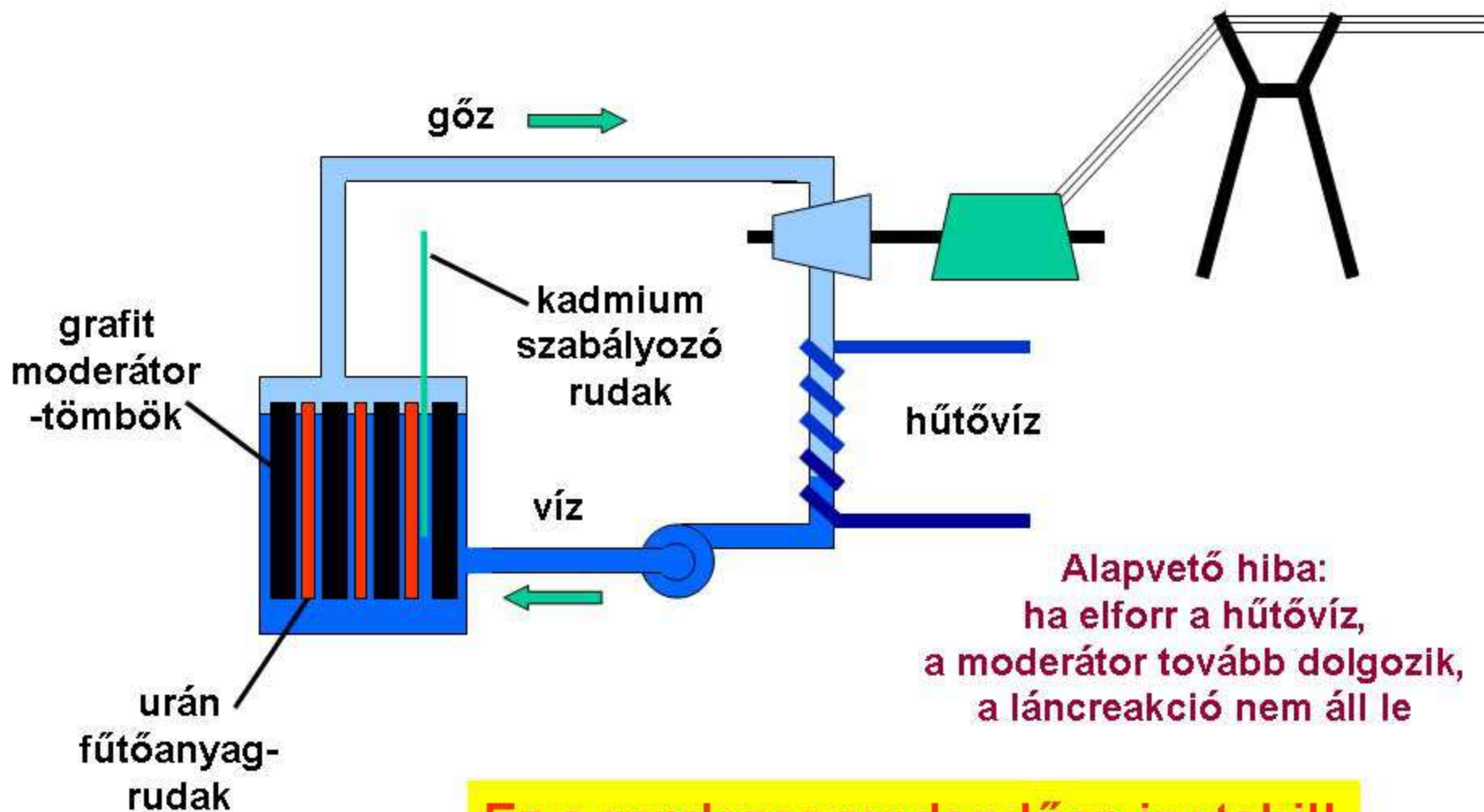
# Grafitmoderátoros erőmű

(Csernobil)



# Grafitmoderátoros erőmű

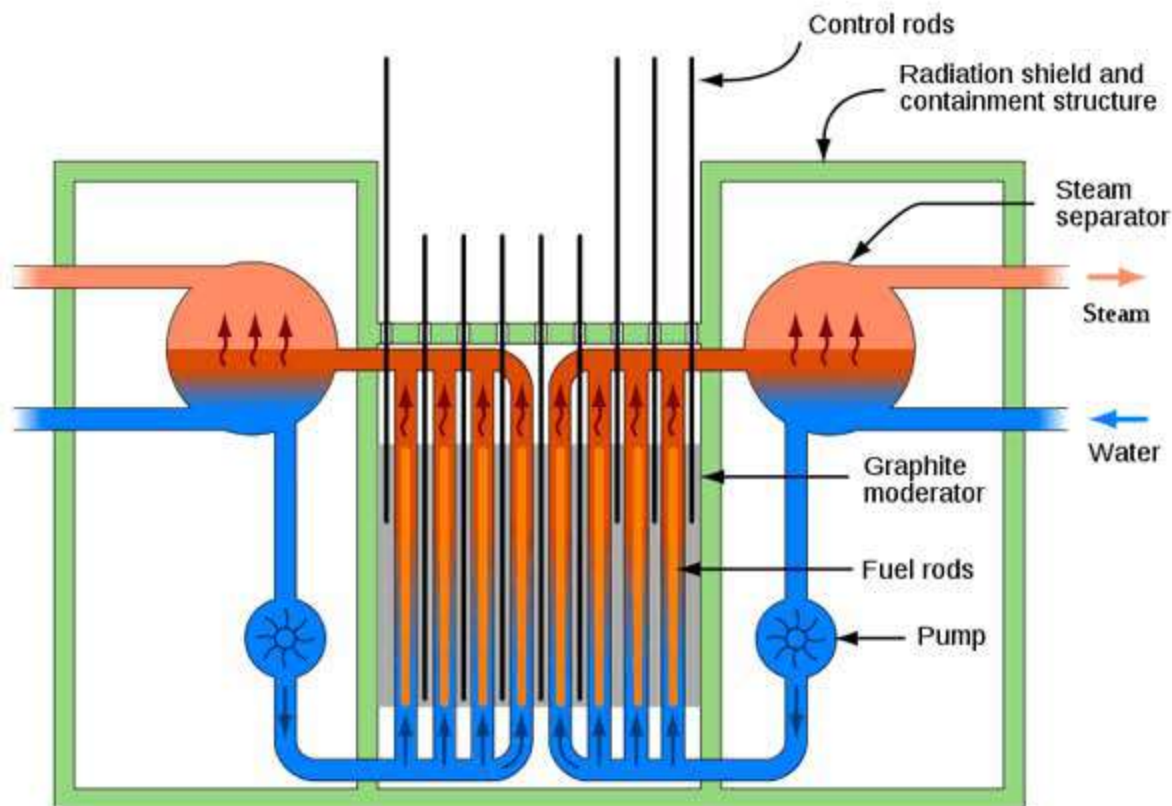
(Csernobil)



**Ez a rendszer eredendően instabil!**



# Grafitmoderátoros erőmű





# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)



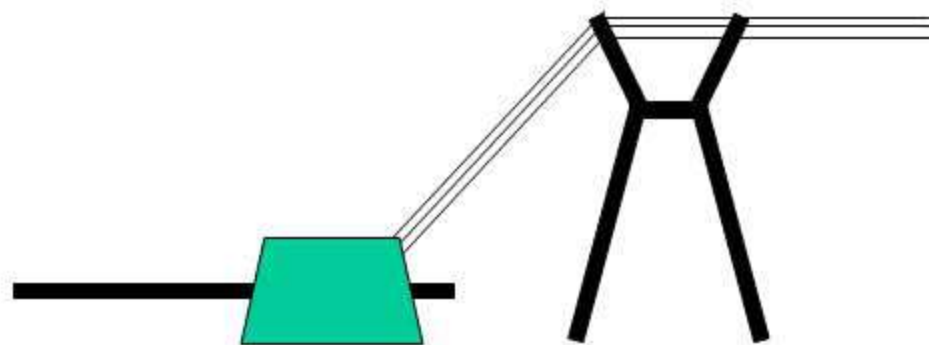
# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

(Fukusima)



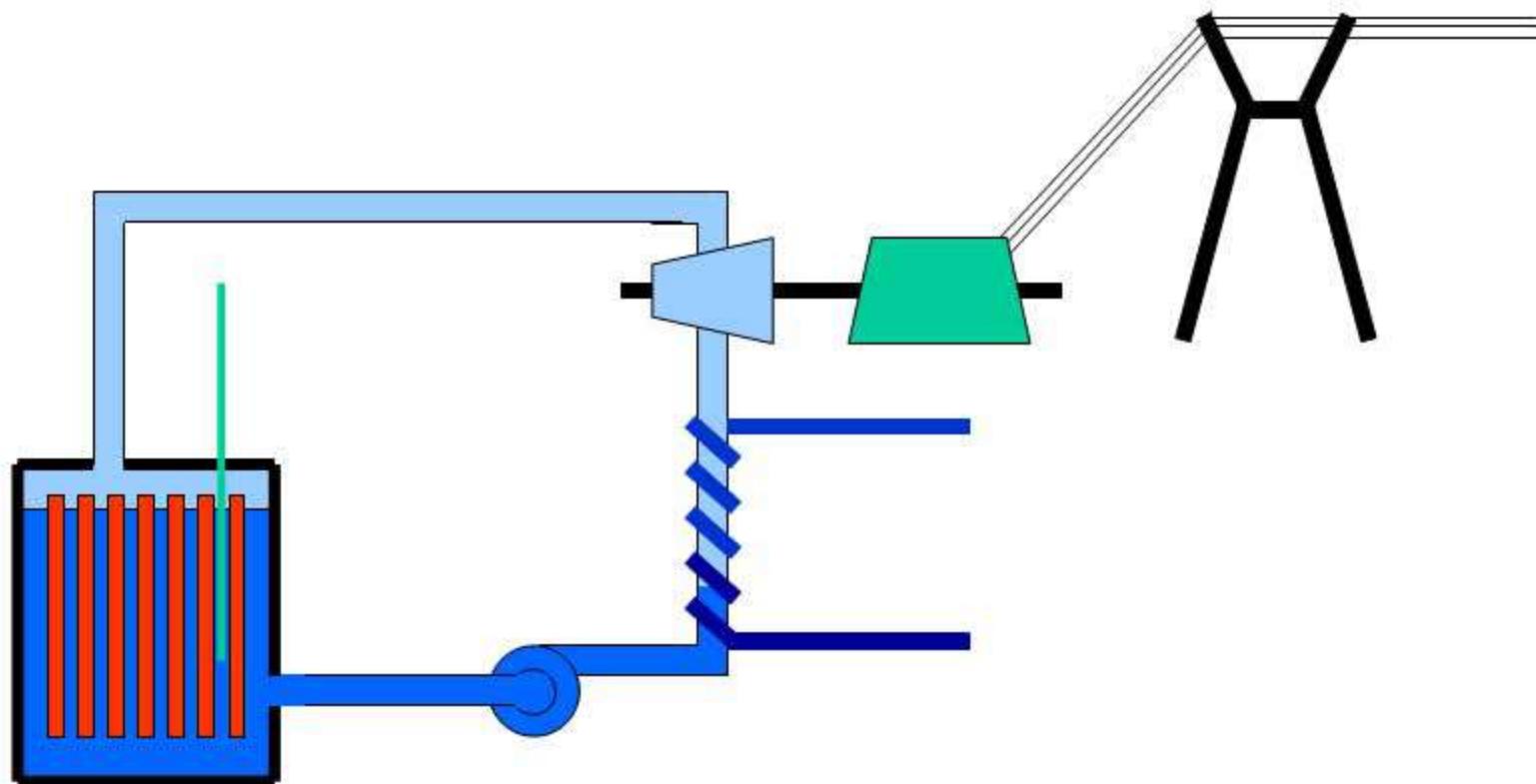
# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

(Fukusima)



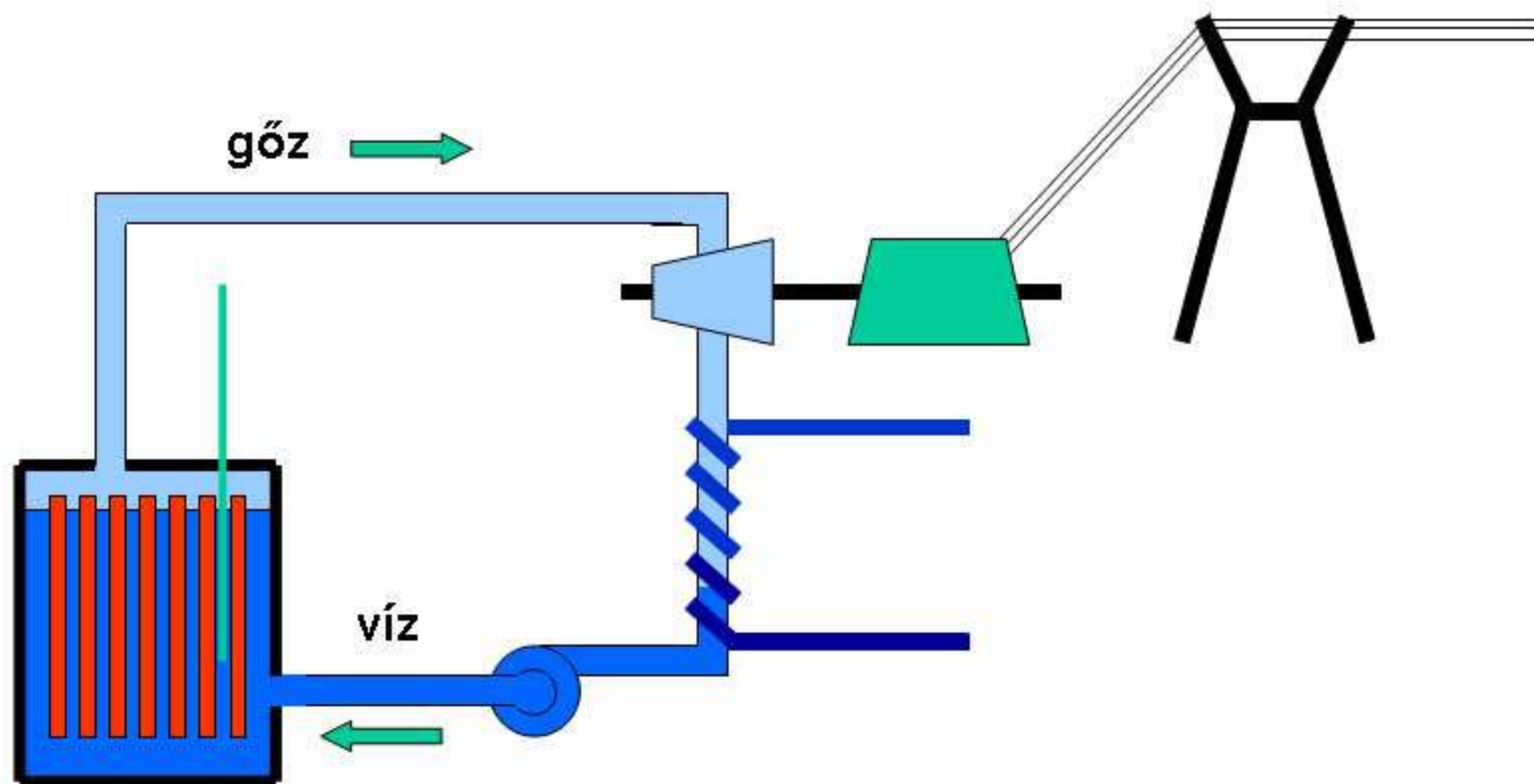
# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

(Fukusima)

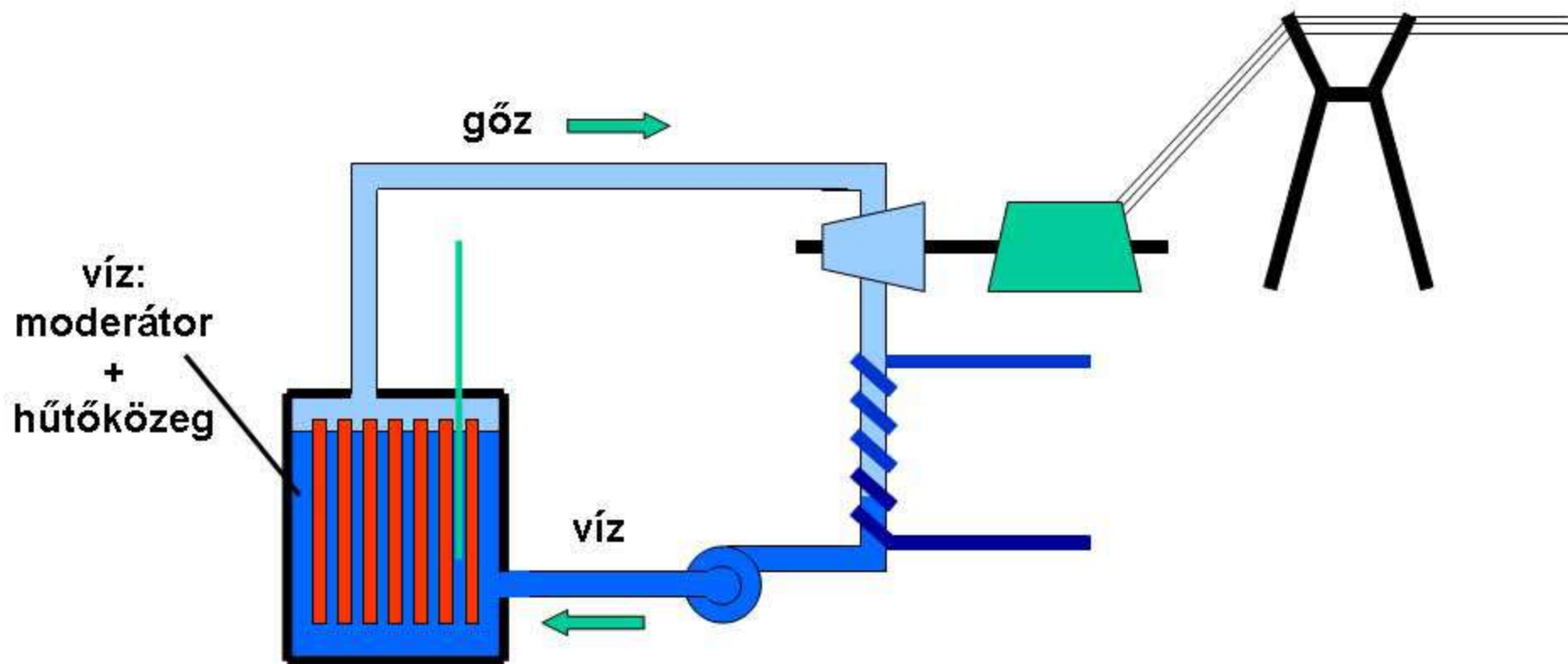


# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

(Fukusima)

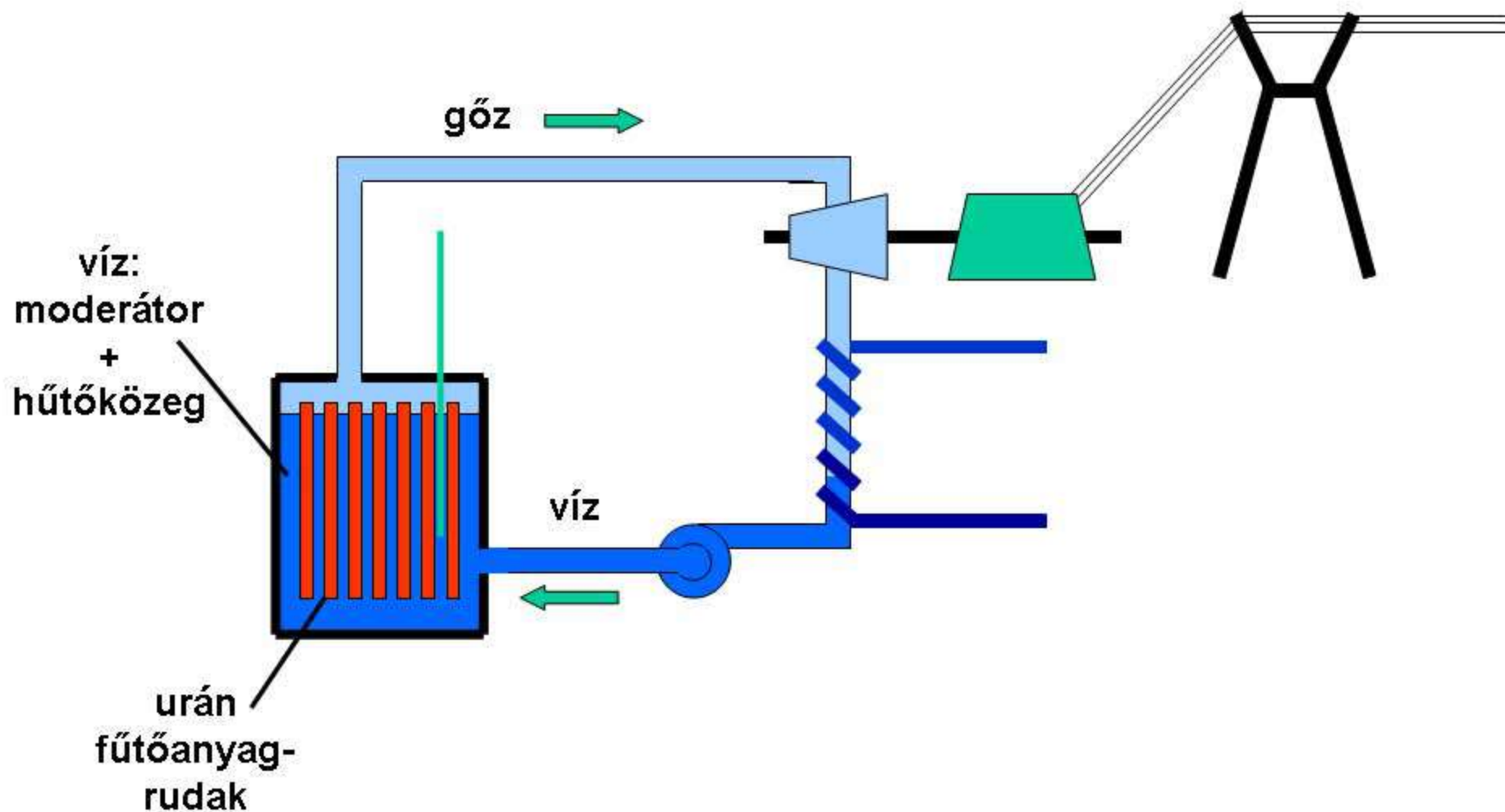


# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR) (Fukusima)



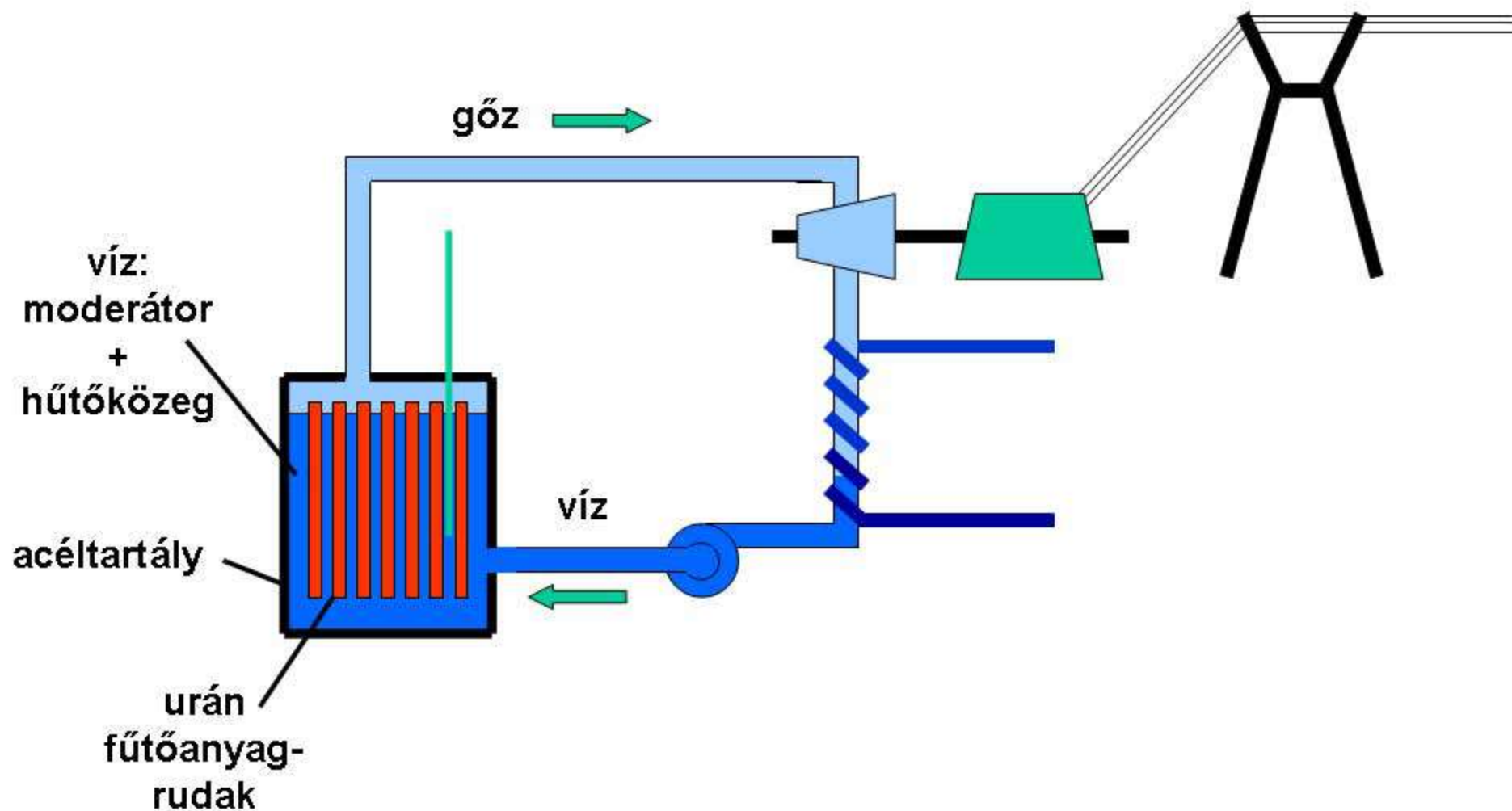
# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

(Fukusima)



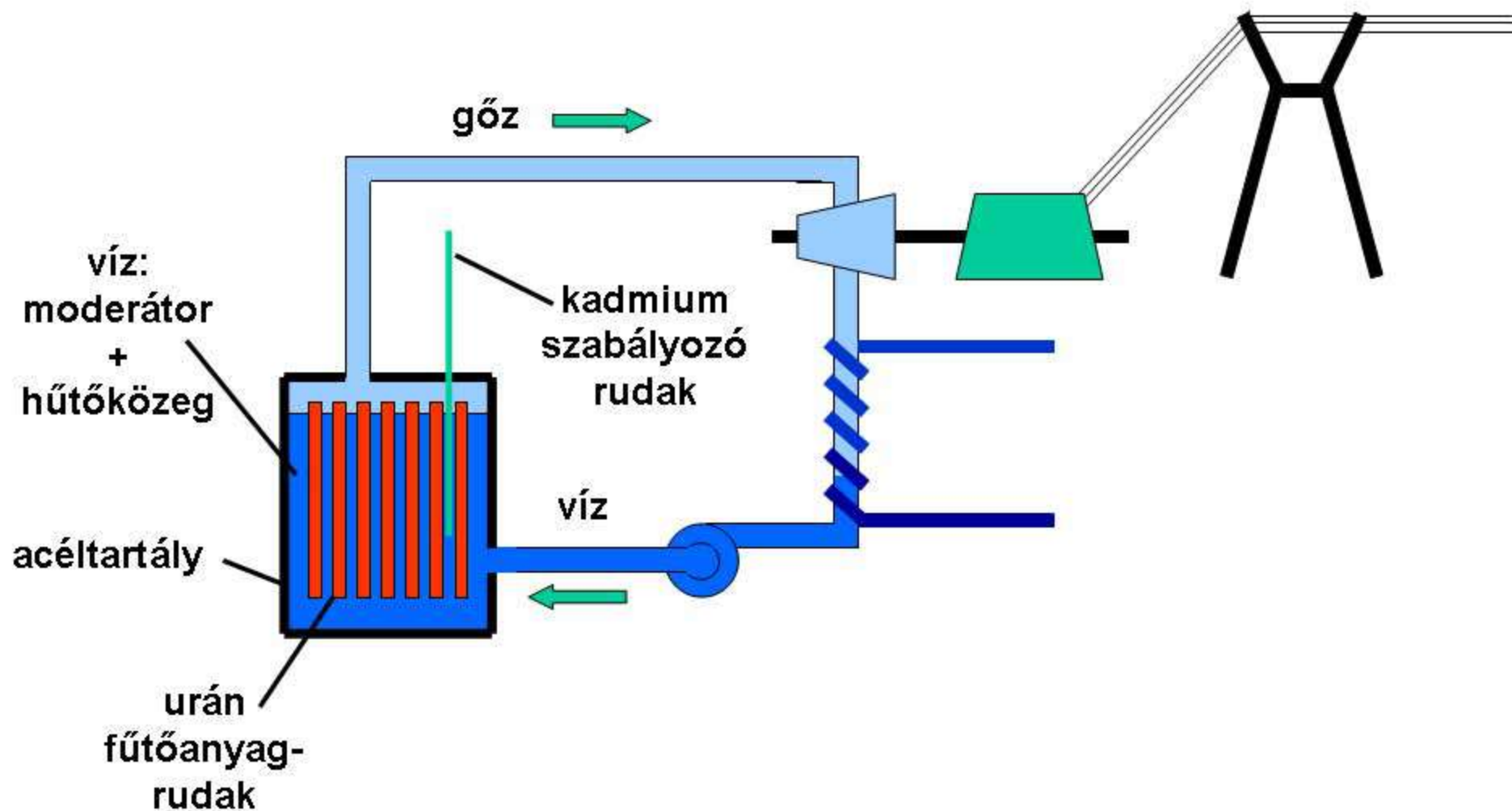
# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

(Fukusima)



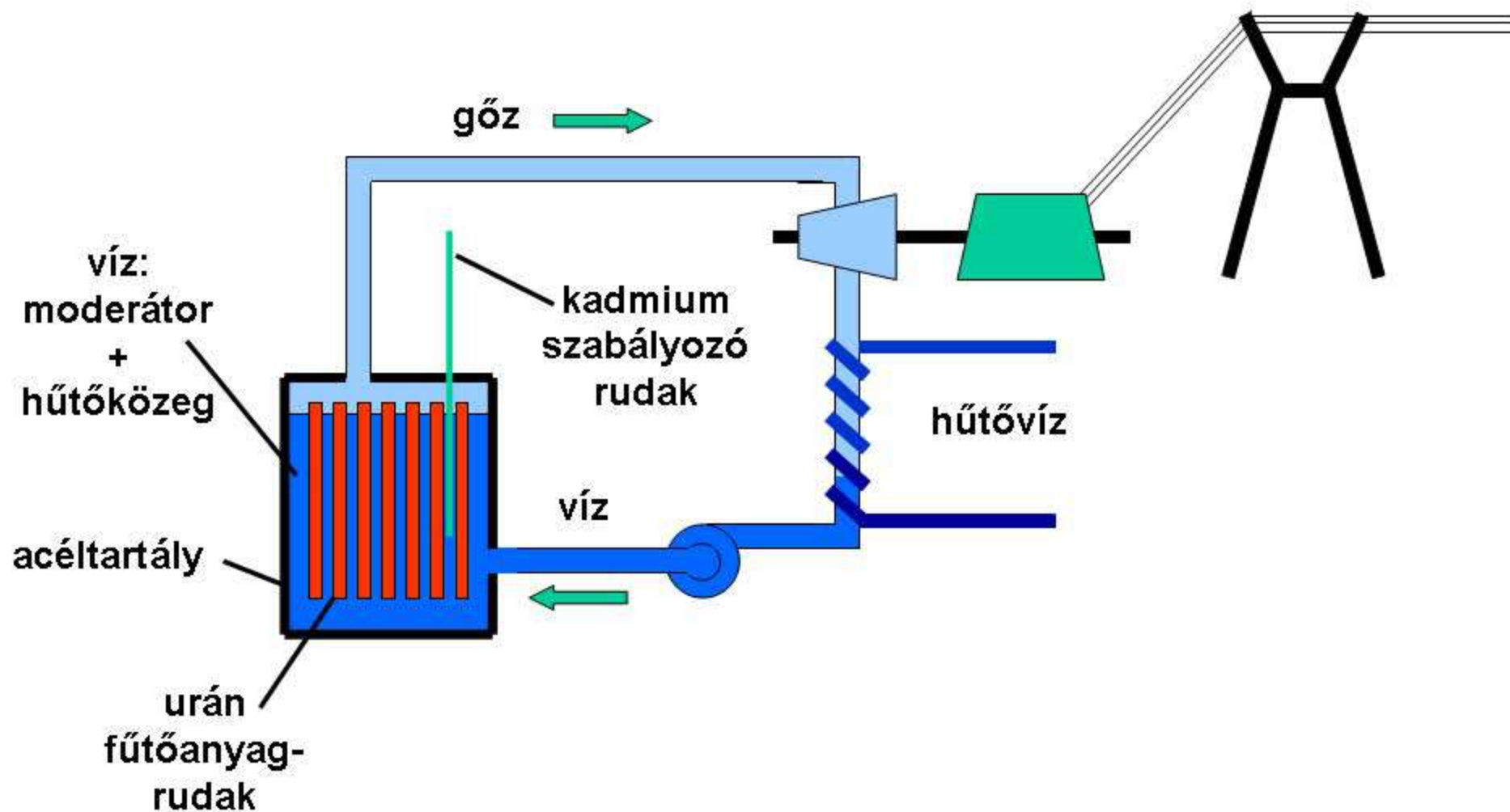


# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR) (Fukusima)



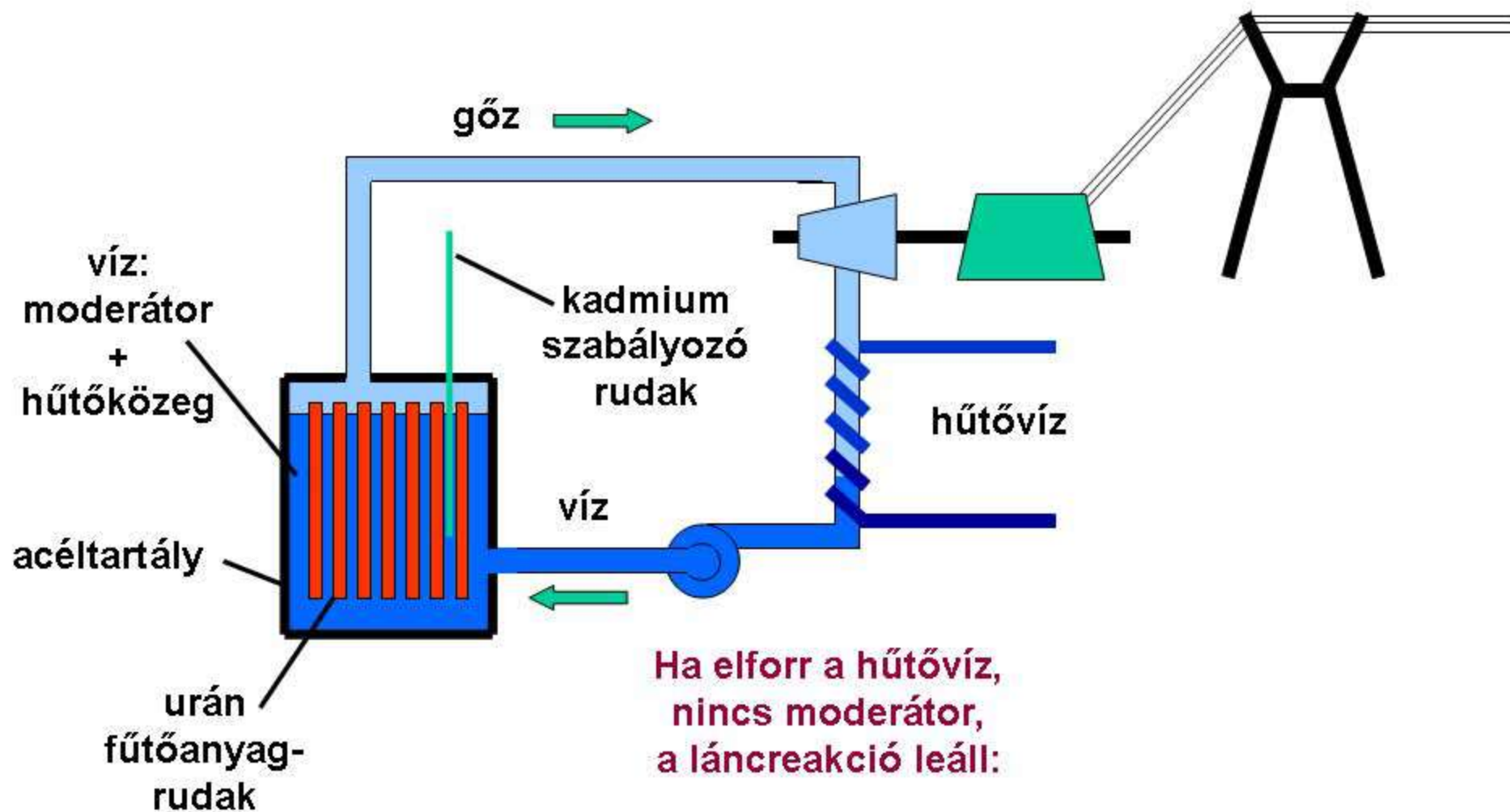
# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

(Fukusima)

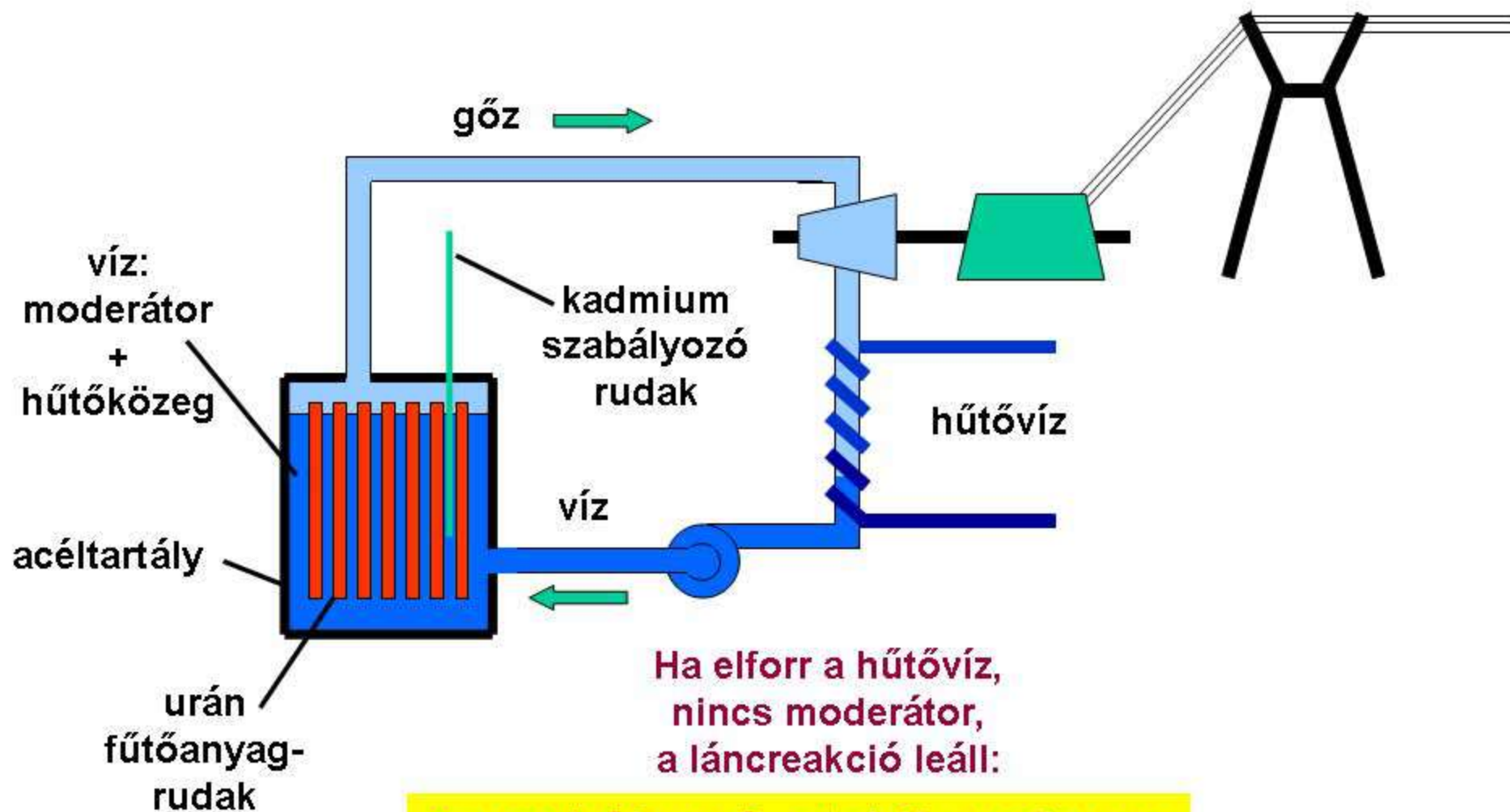


# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

(Fukusima)



# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR) (Fukusima)

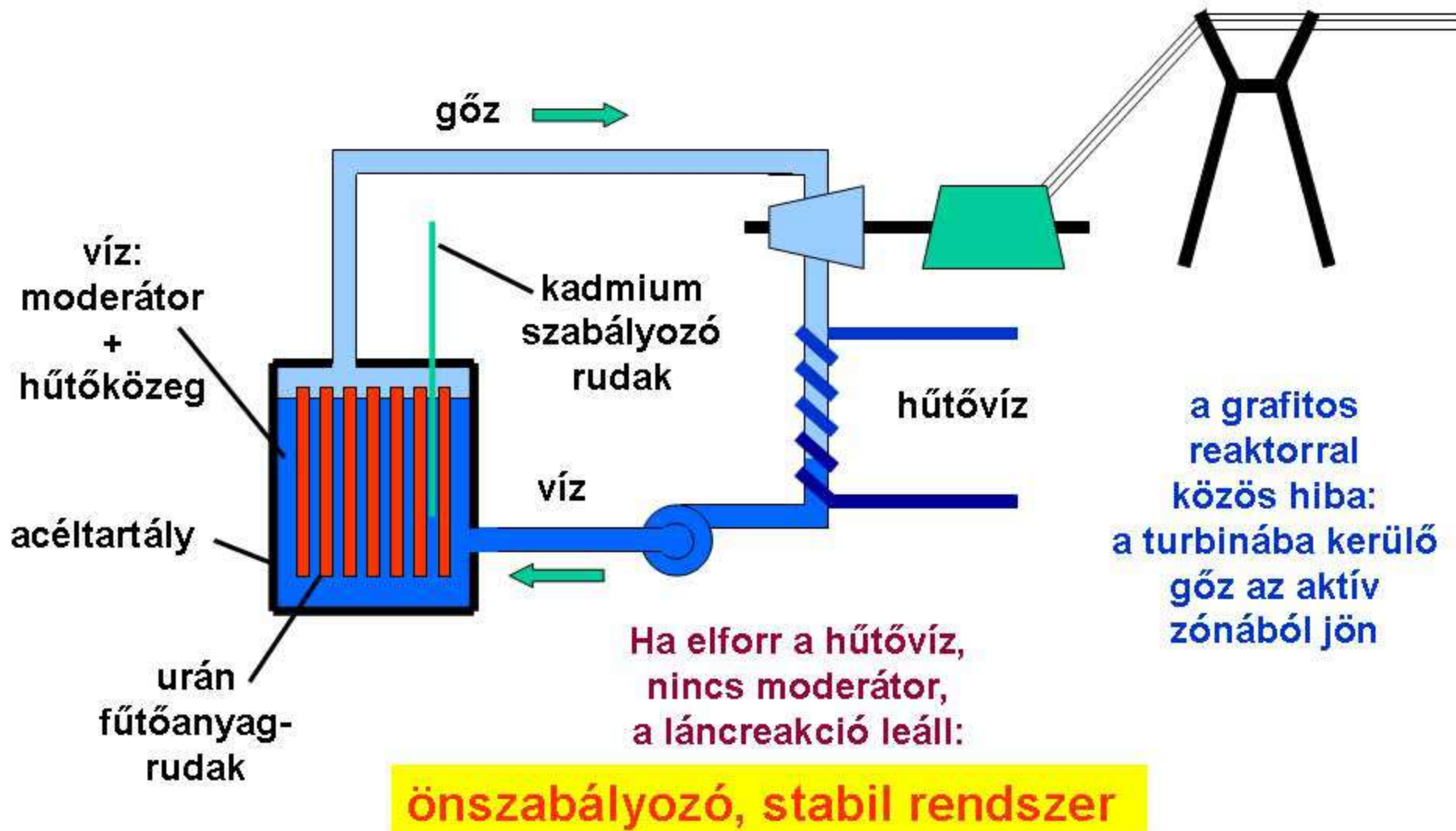


**önszabályozó, stabil rendszer**



# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)

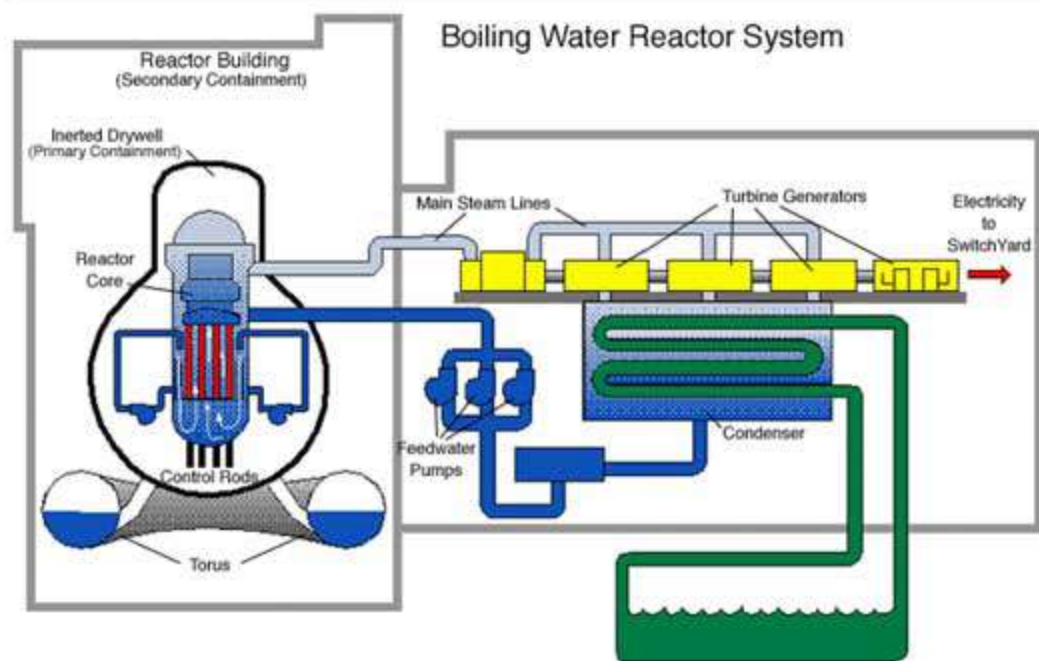
(Fukusima)



## Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)



# Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)



## Boiling Water Reactor (BWR)

Secondary containment:  
Area of explosion at  
Fukushima Daiichi 1

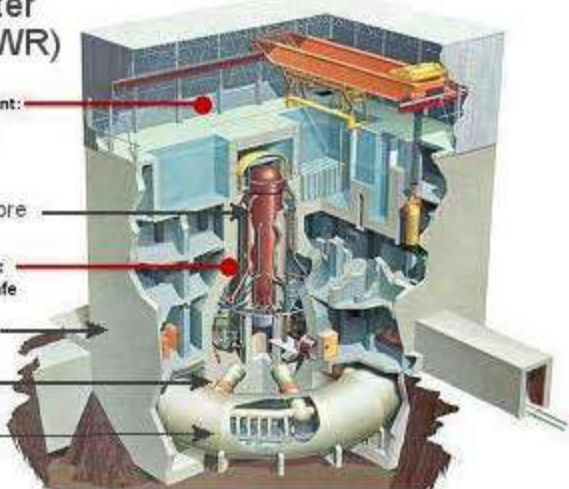
reactor core

Primary containment:  
Remains intact and safe

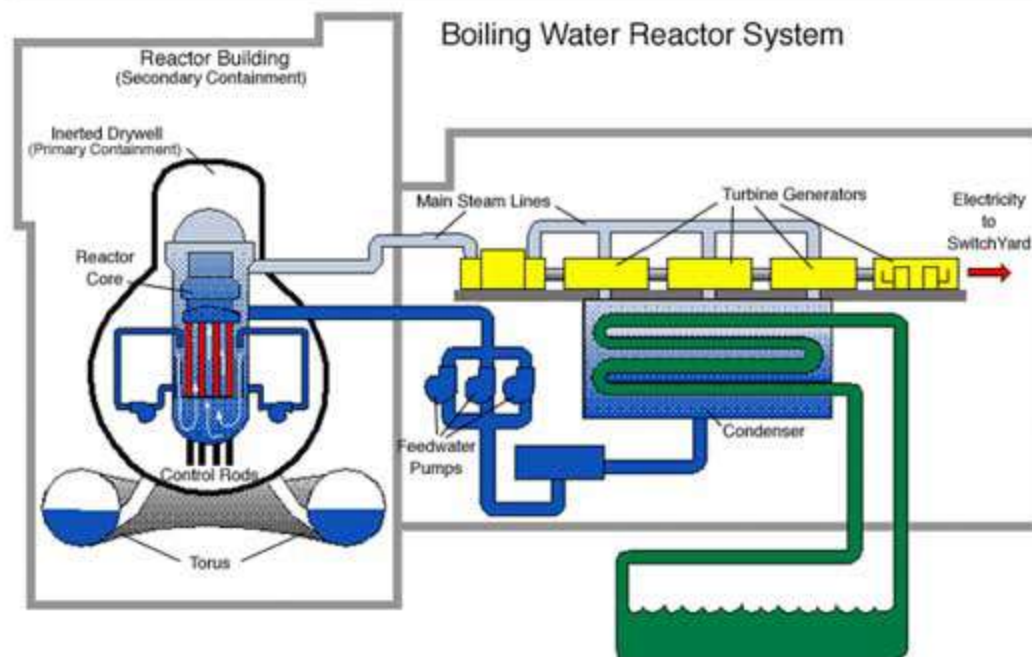
concrete shielding

water pump

pressure-  
suppression pool



## Vízforraló reaktoros erőmű (BWR)





# Nyomottvizes reaktor (PWR)



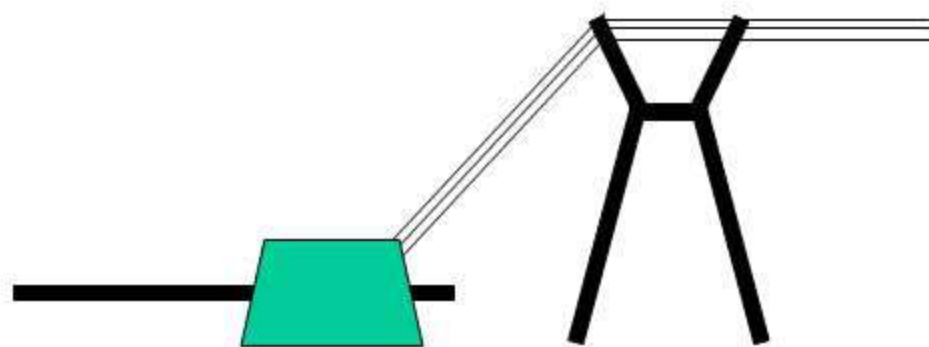
# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)



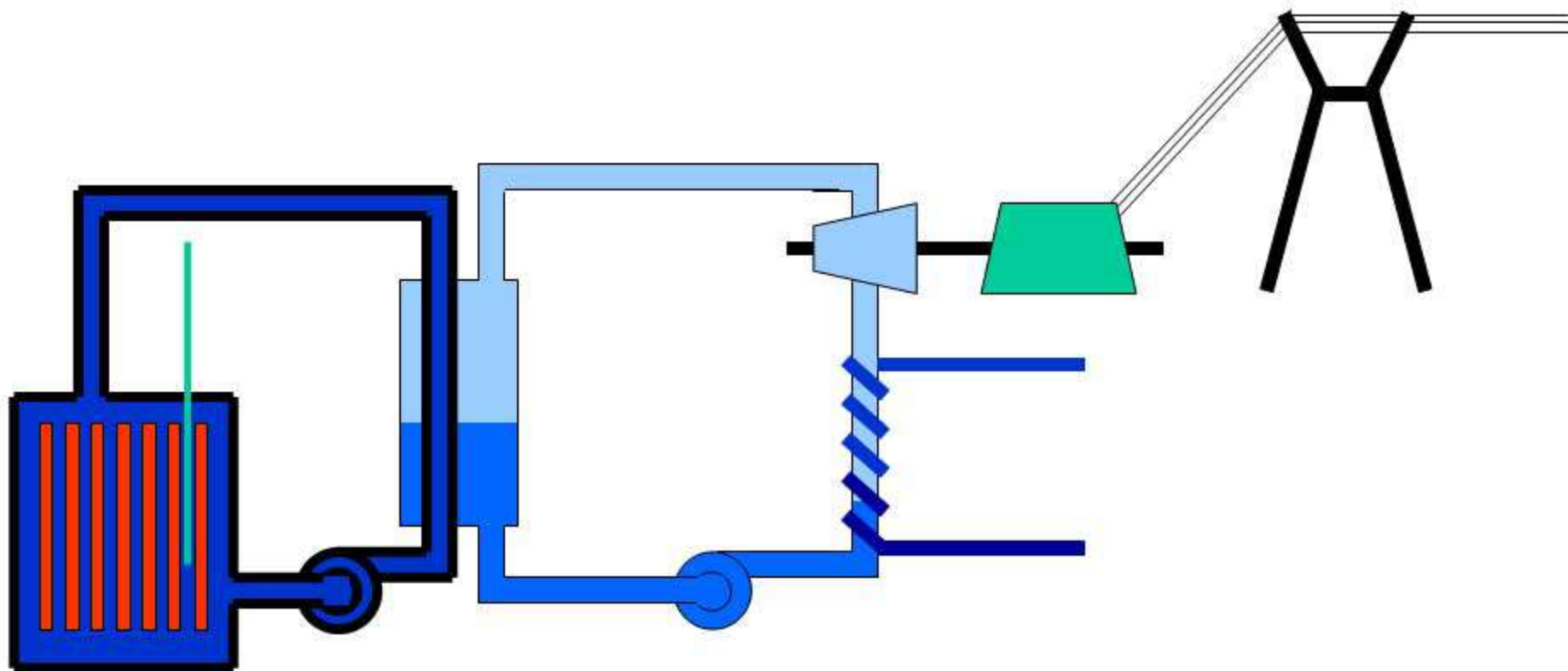
# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)



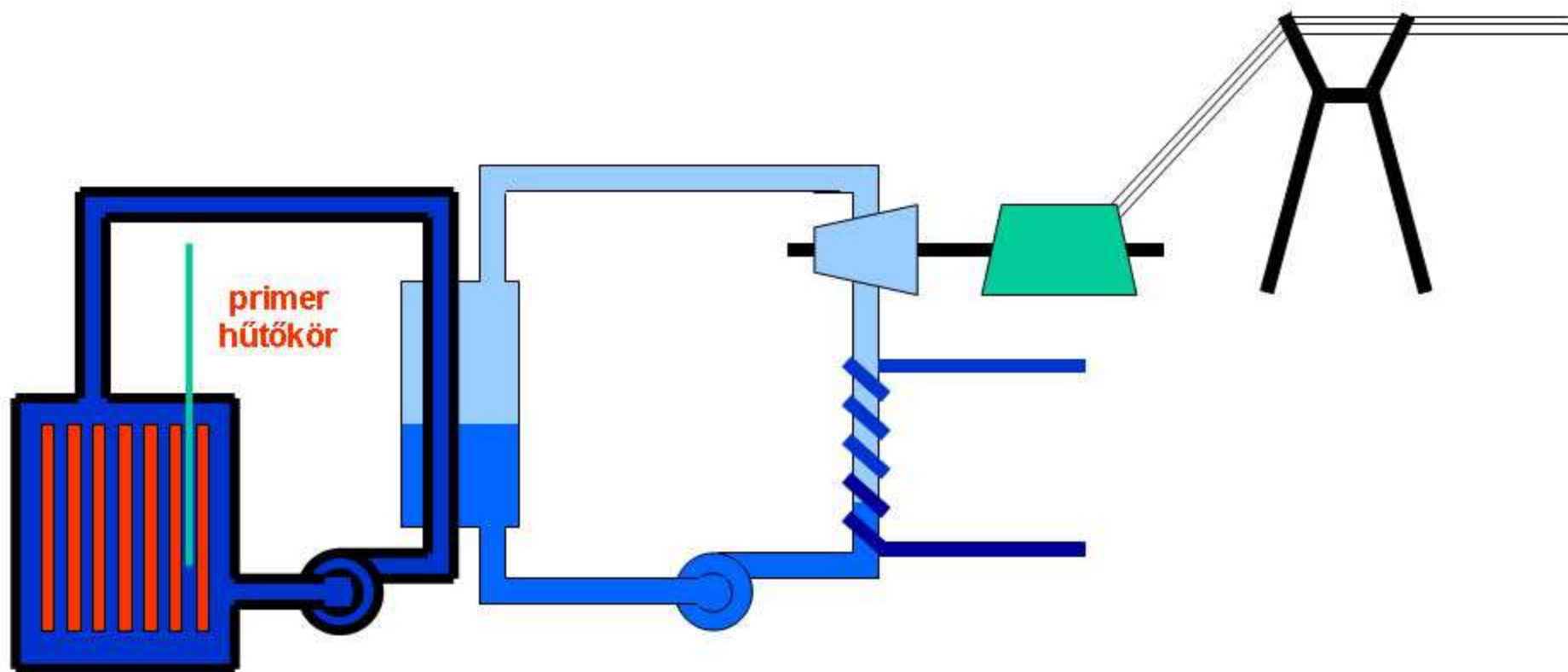
# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)



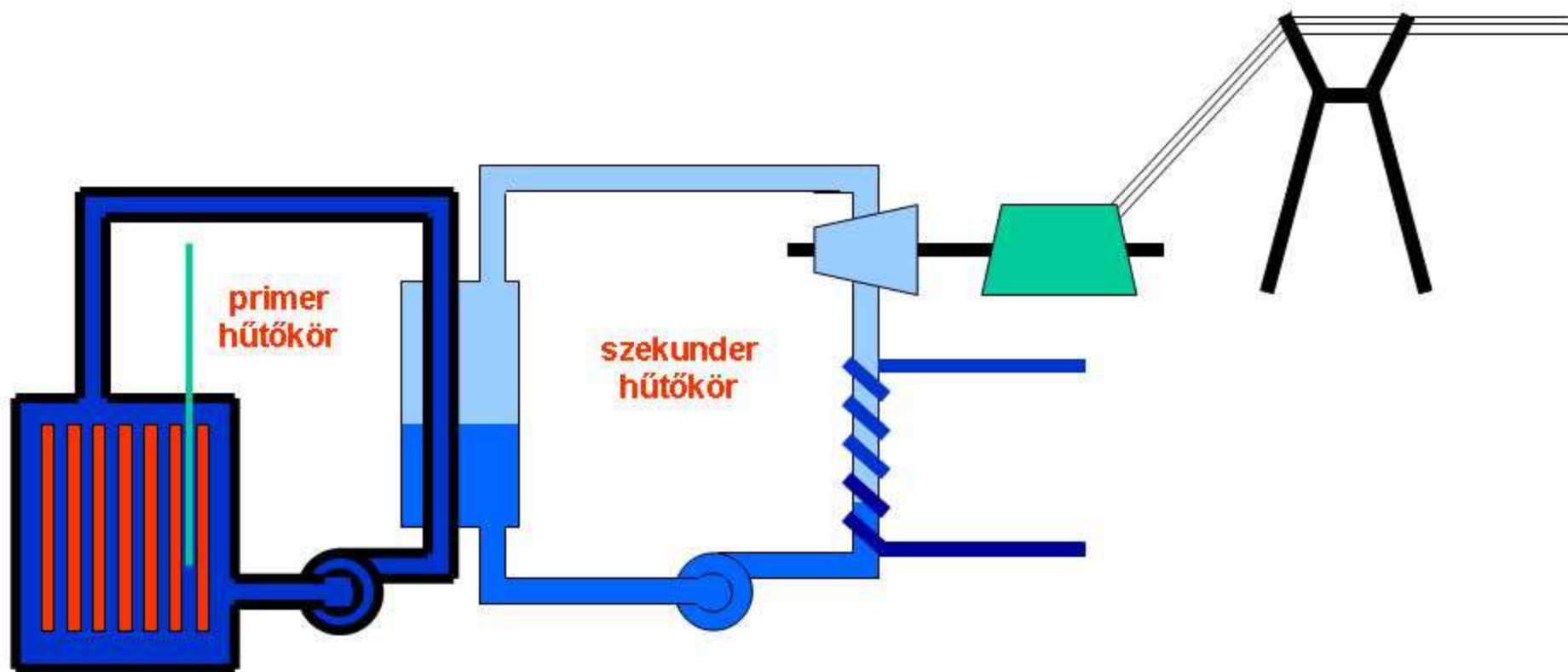
# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)



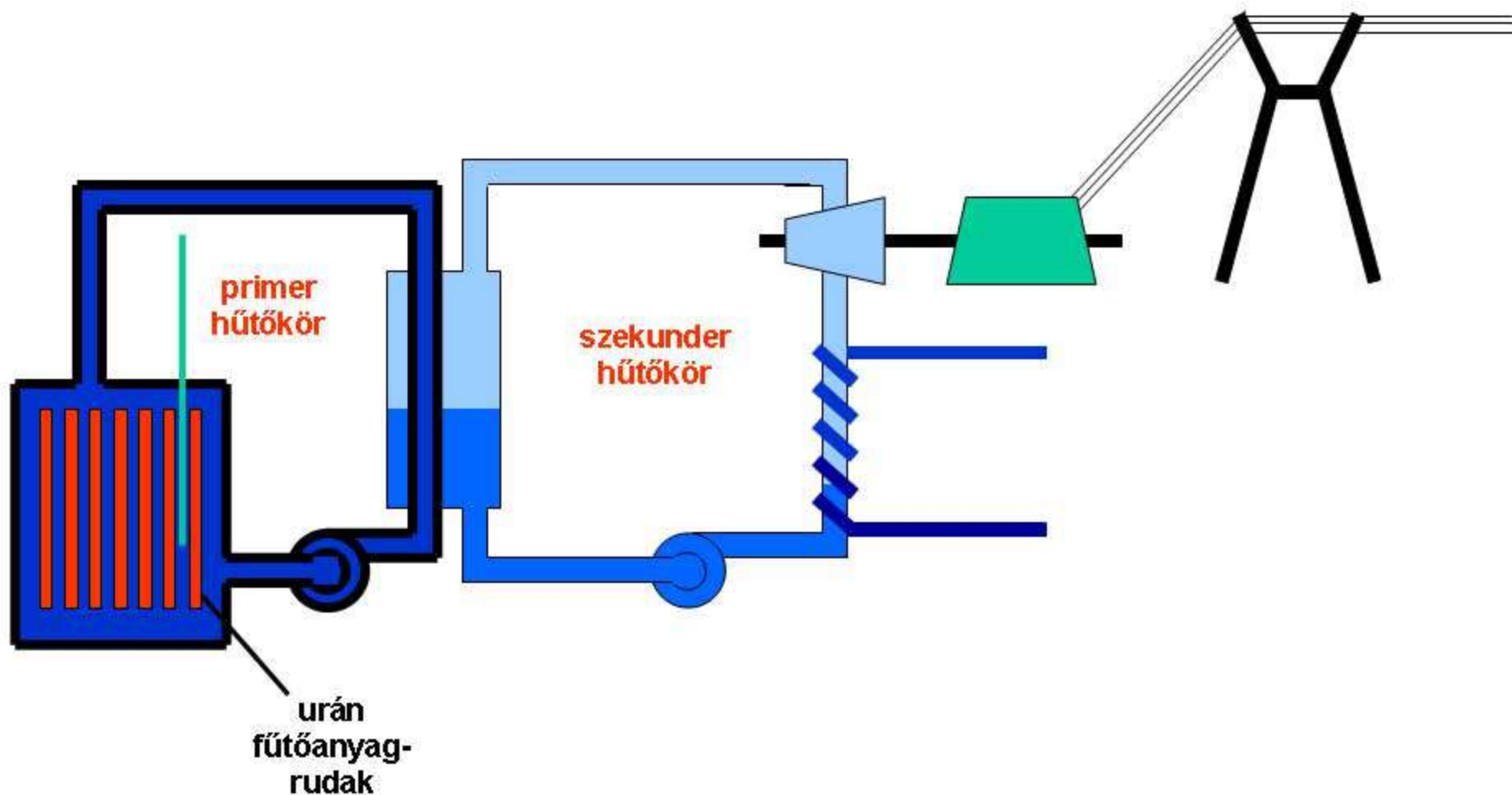
# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)



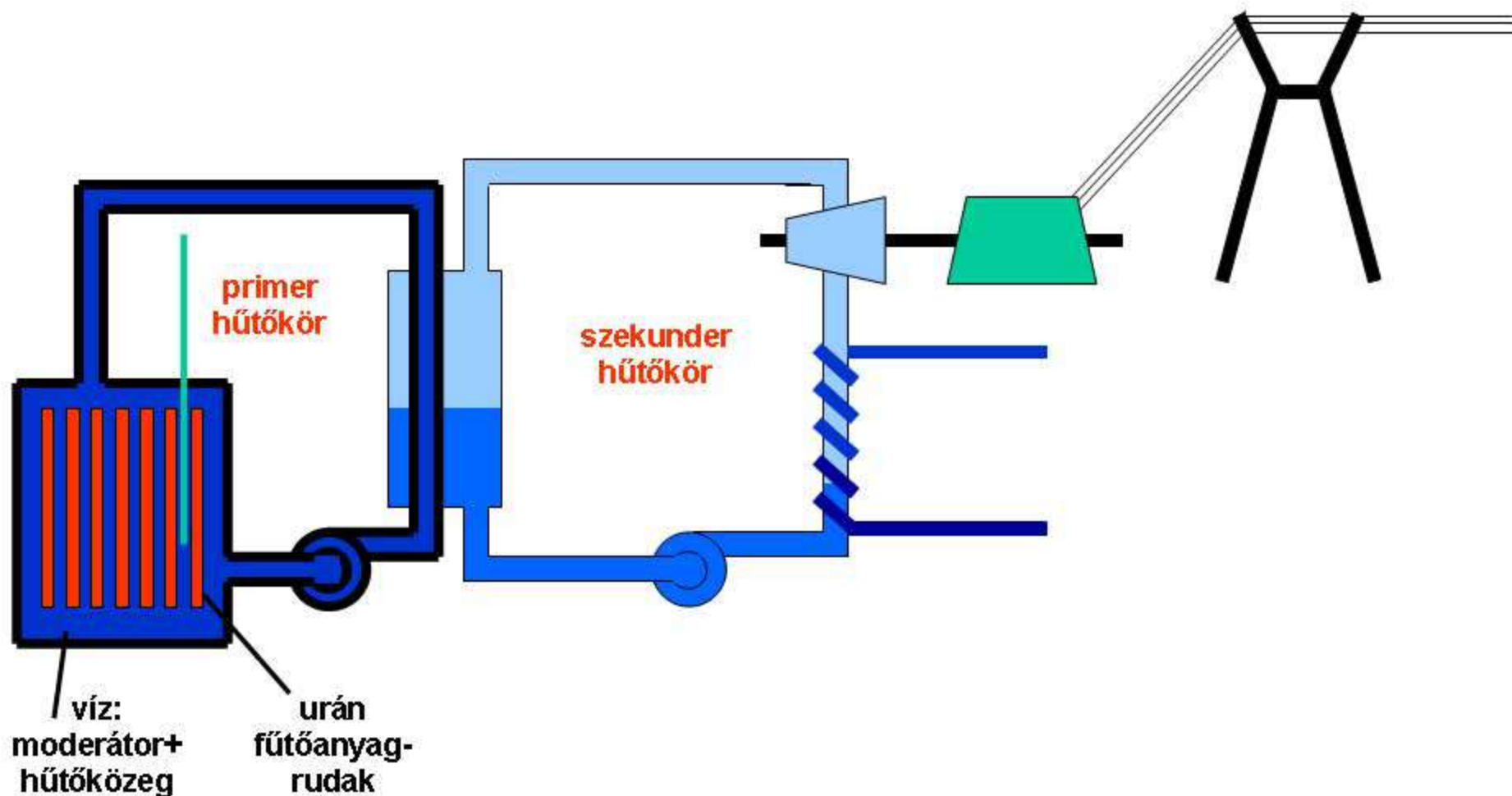
# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)



# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

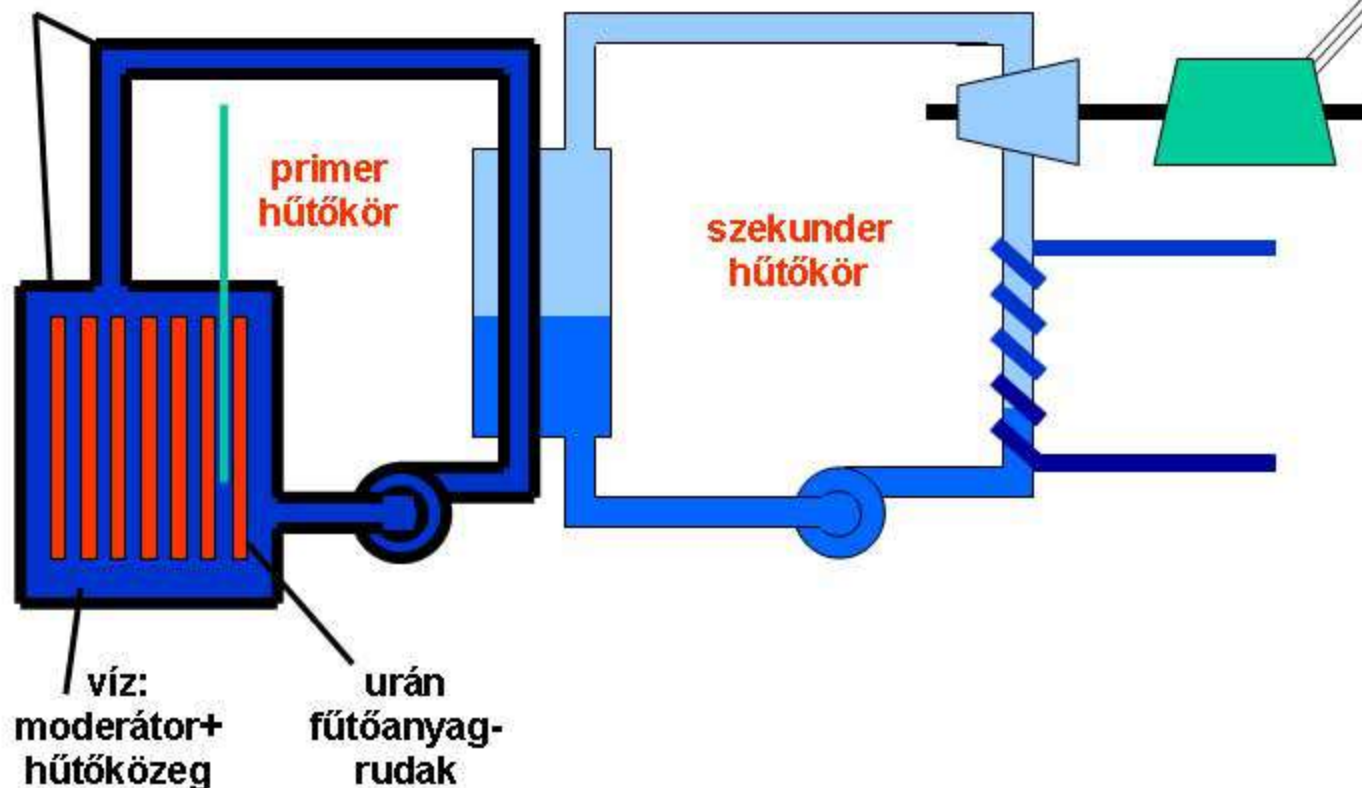




# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

nagynyomású  
acéltartály és  
acélcsövek



# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

nagynyomású  
acéltartály és  
acélcsövek

nagynyomású  
víz (250 °C)

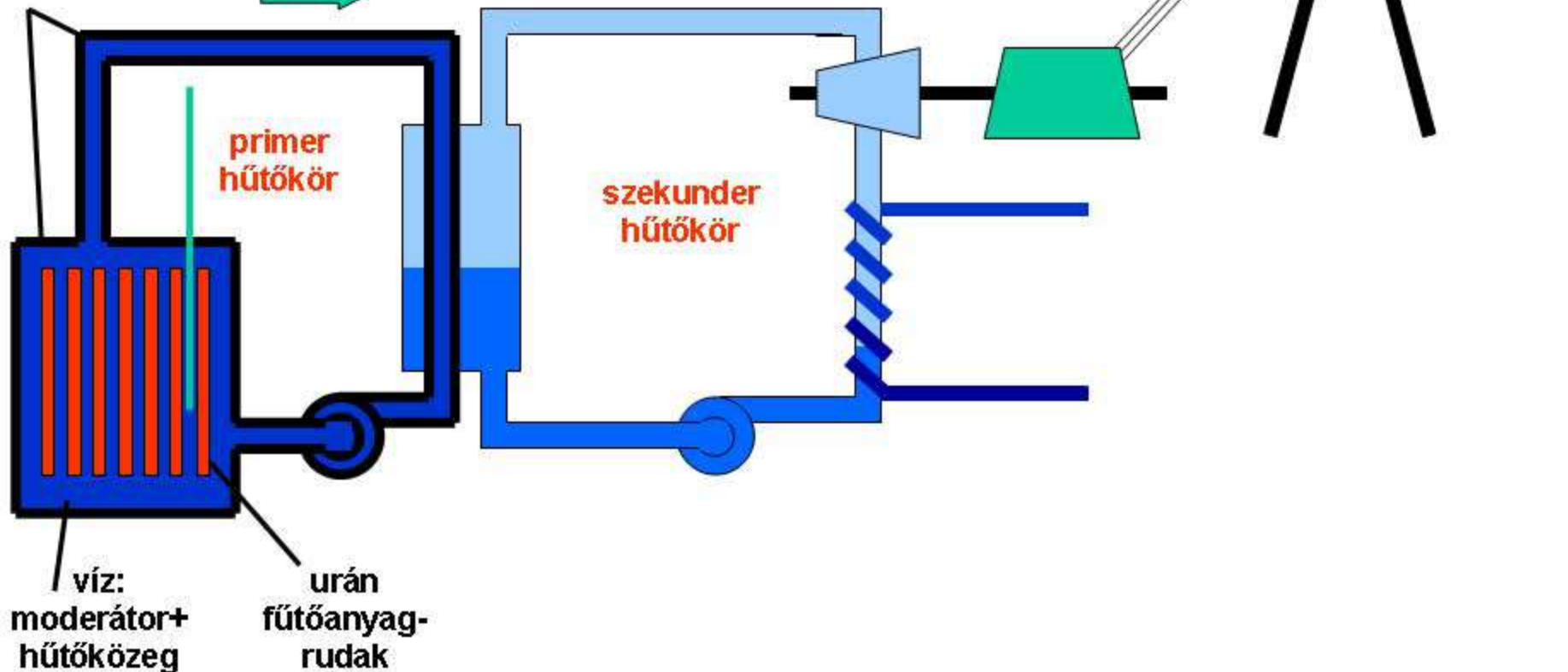


primer  
hűtőkör

szekunder  
hűtőkör

víz:  
moderátor+  
hűtőközeg

urán  
fűtőanyag-  
rudak



# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

nagynyomású  
acéltartály és  
acélcsövek

nagynyomású  
víz (250 °C)



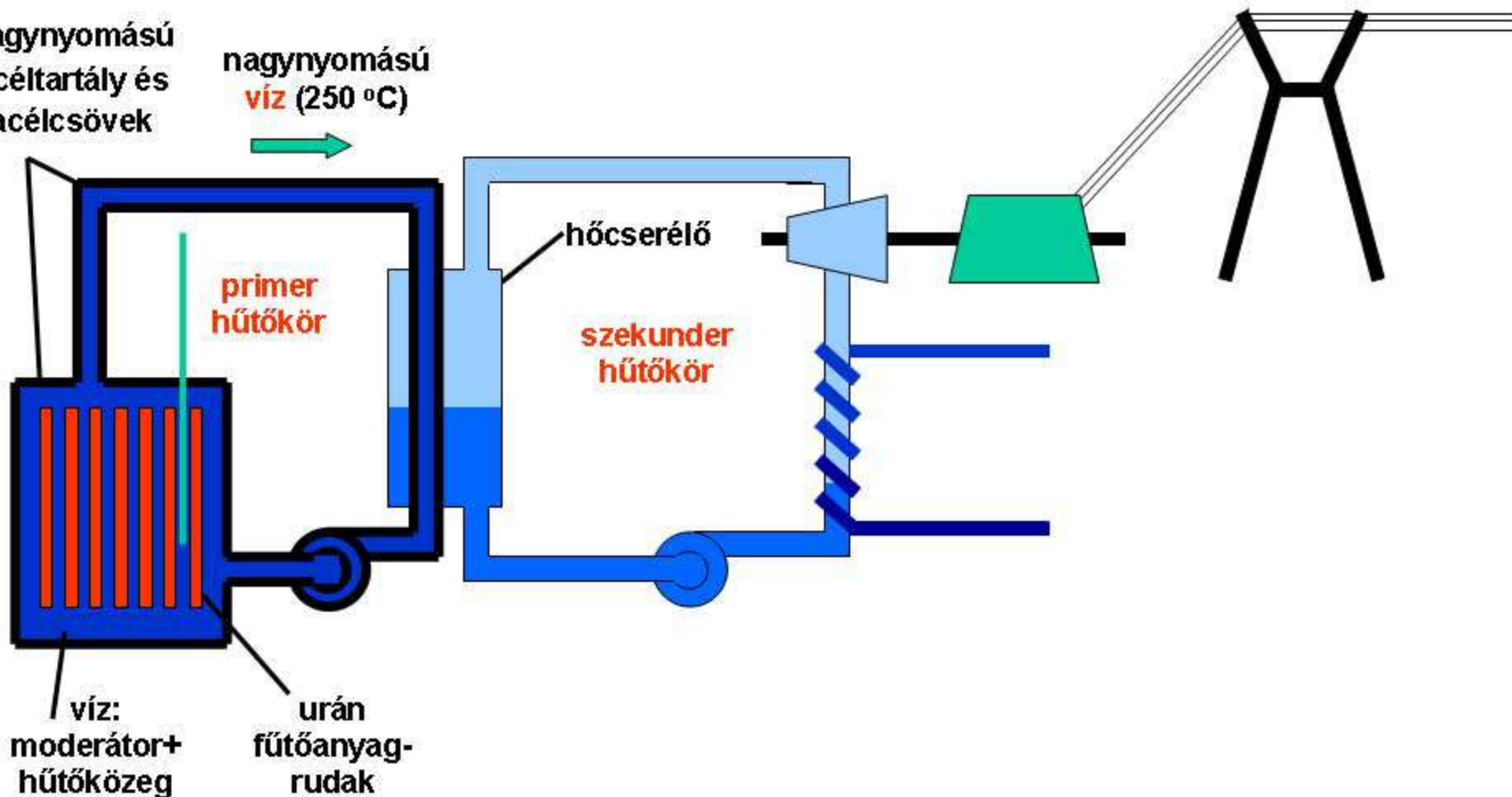
primer  
hűtőkör

hőcserélő

szekunder  
hűtőkör

víz:  
moderátor+  
hűtőközeg

urán  
fűtőanyag-  
rudak



# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

nagynyomású  
acéltartály és  
acélcsovek

nagynyomású  
víz (250 °C)

gőz  
(nem szennyezett)

primer  
hűtőkör

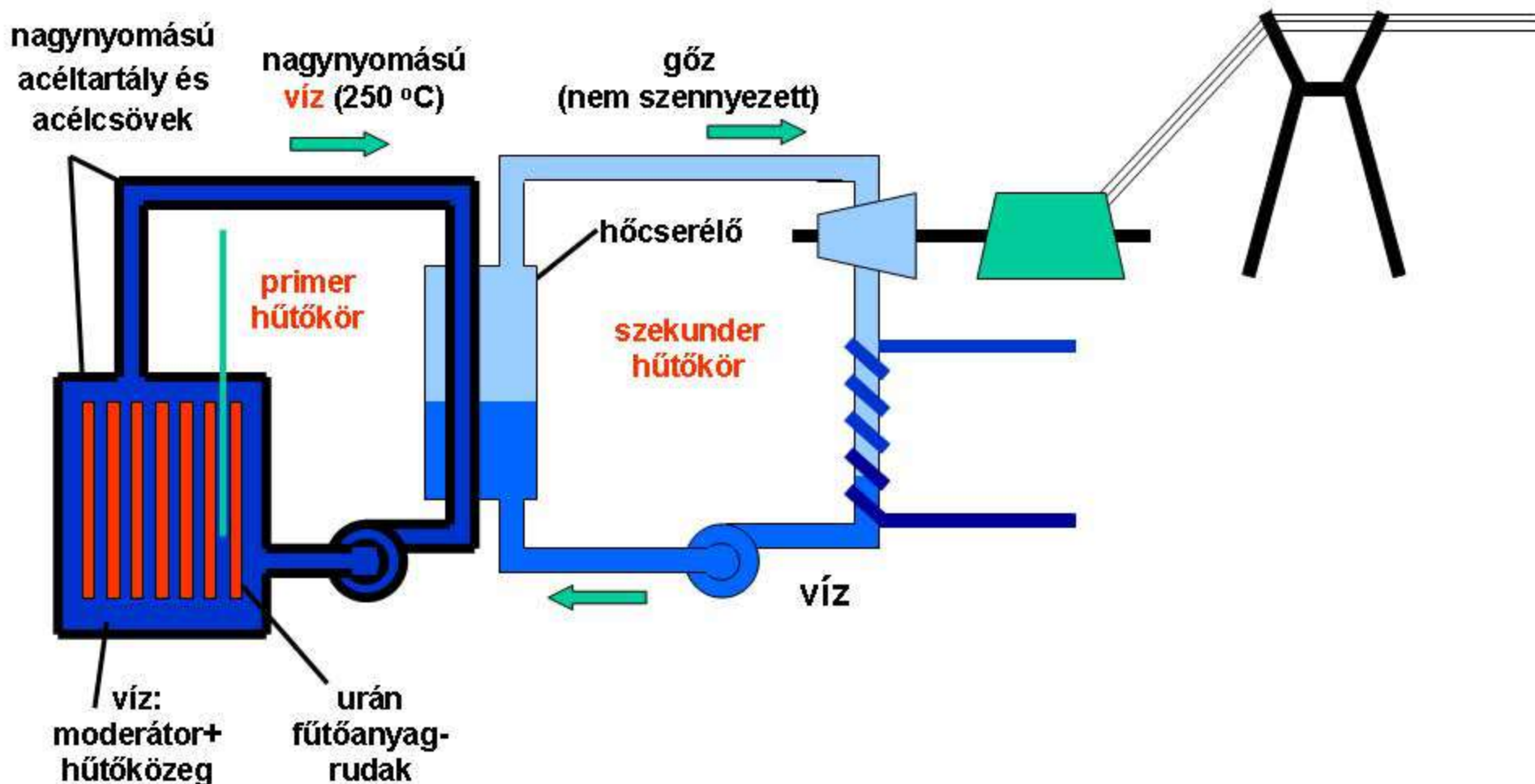
hőcserélő

szekunder  
hűtőkör

víz

víz:  
moderátor+  
hűtőközeg

urán  
fűtőanyag-  
rudak



# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

nagynyomású  
acéltartály és  
acélcsövek

nagynyomású  
víz (250 °C)

gőz  
(nem szennyezett)

primer  
hűtőkör

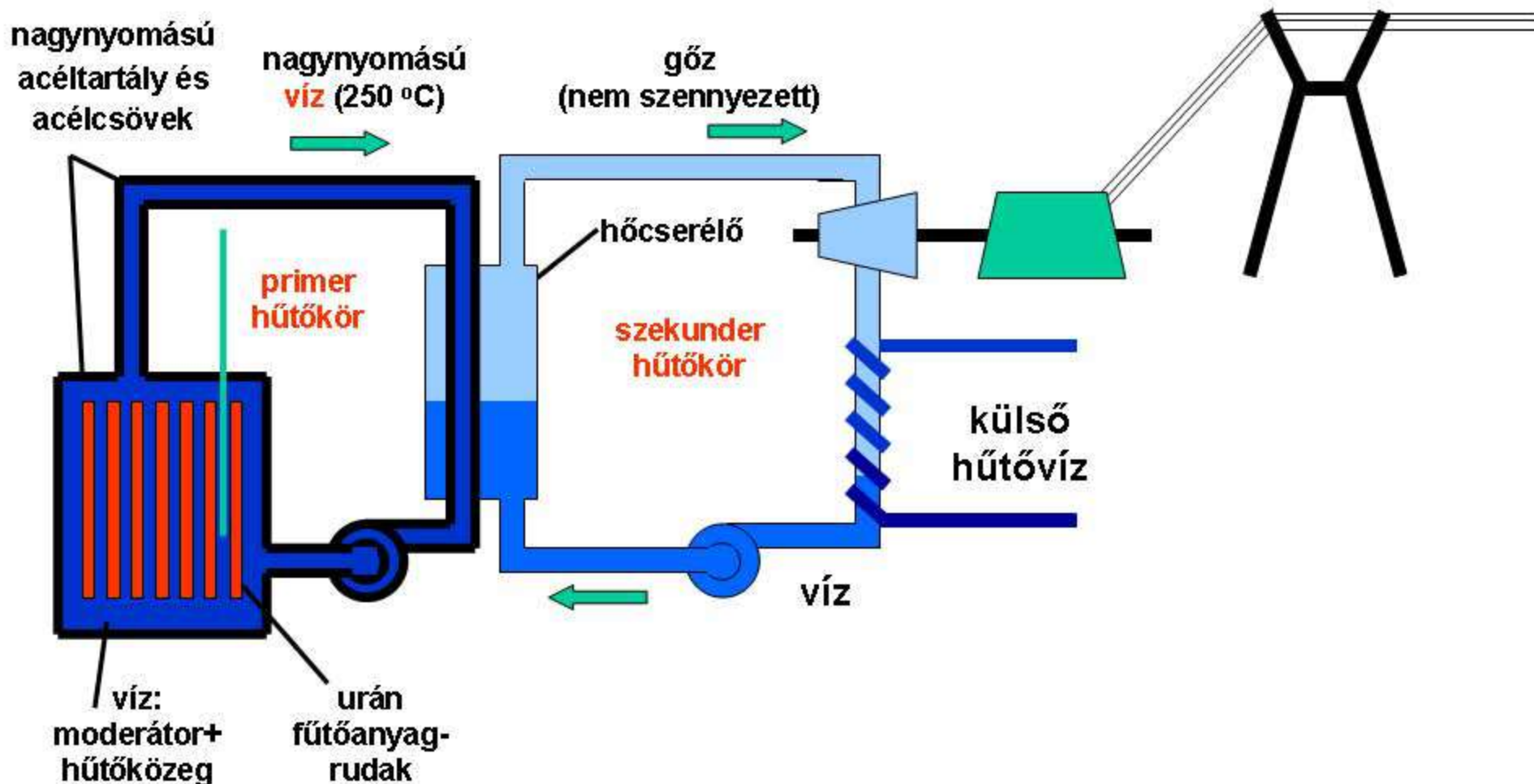
szekunder  
hűtőkör

külső  
hűtővíz

víz:  
moderátor+  
hűtőközeg

urán  
fűtőanyag-  
rudak

víz



# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

nagynyomású  
acéltartály és  
acélcsövek

nagynyomású  
víz (250 °C)

gőz  
(nem szennyezett)

primer  
hűtőkör

szekunder  
hűtőkör

külső  
hűtővíz

víz

víz:  
moderátor+  
hűtőközeg

urán  
fűtőanyag-  
rudak

Ha elforr a hűtővíz,  
nincs moderátor,  
a láncreakció leáll:



# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

nagynyomású  
acéltartály és  
acélcsovek

nagynyomású  
víz (250 °C)

gőz  
(nem szennyezett)

primer  
hűtőkör

szekunder  
hűtőkör

külső  
hűtővíz

víz

víz:  
moderátor+  
hűtőközeg

urán  
fűtőanyag-  
rudak

Ha elforr a hűtővíz,  
nincs moderátor,  
a láncreakció leáll:

**önszabályozó,  
stabil rendszer**



# Nyomottvizes reaktor (PWR)

(Paks)

nagynyomású  
acéltartály és  
acélcsövek

nagynyomású  
víz (250 °C)

gőz  
(nem szennyezett)

primer  
hűtőkör

szekunder  
hűtőkör

külső  
hűtővíz

víz

víz:  
moderátor+  
hűtőközeg

urán  
fűtőanyag-  
rudak

a primer hűtőkör  
radioaktív vize nem  
érintkezik a  
külvilággal!

Ha elforr a hűtővíz,  
nincs moderátor,  
a láncreakció leáll:

önszabályozó,  
stabil rendszer

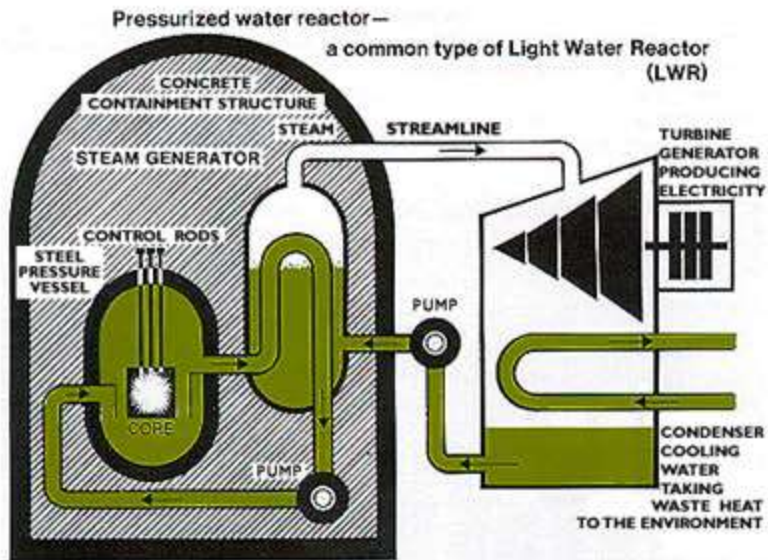




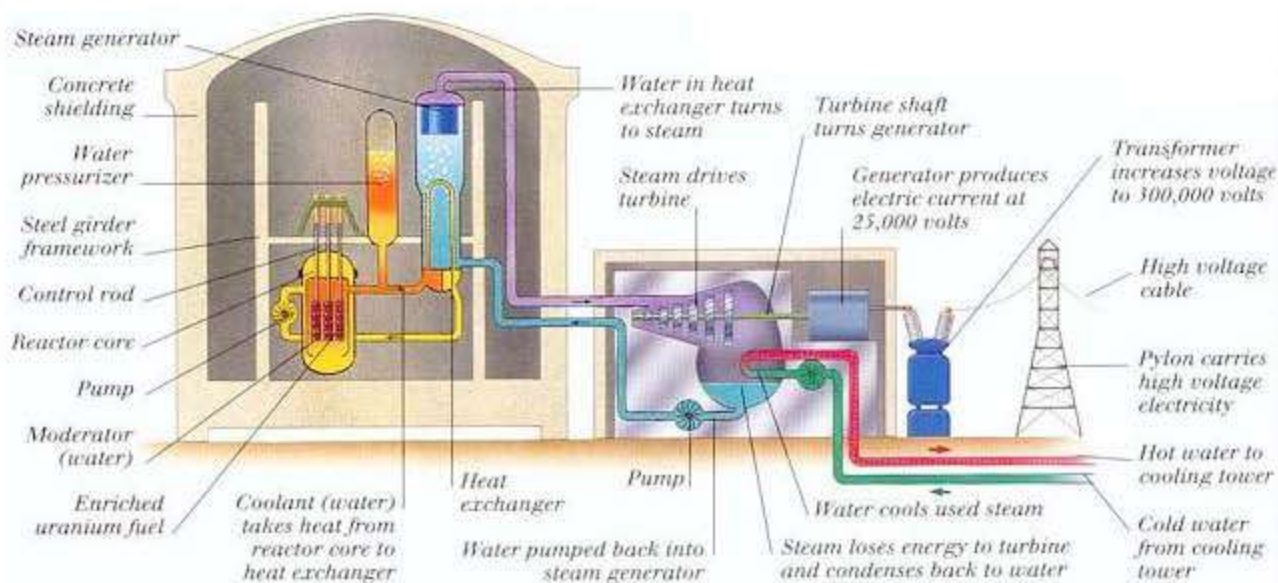
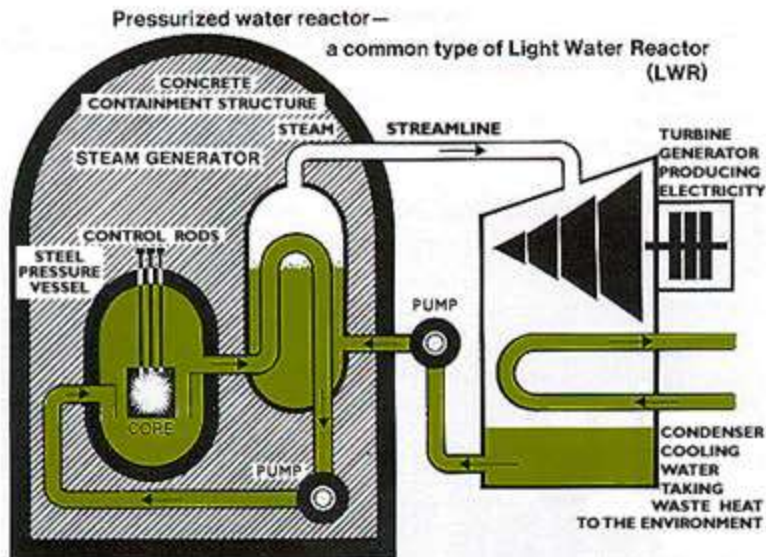
# Nyomottvizes reaktor (PWR)



# Nyomottvizes reaktor (PWR)



# Nyomottvizes reaktor (PWR)



# Kiegészítő fűtőelemek



# Kiégett fűtőelemek

mi van bennük?



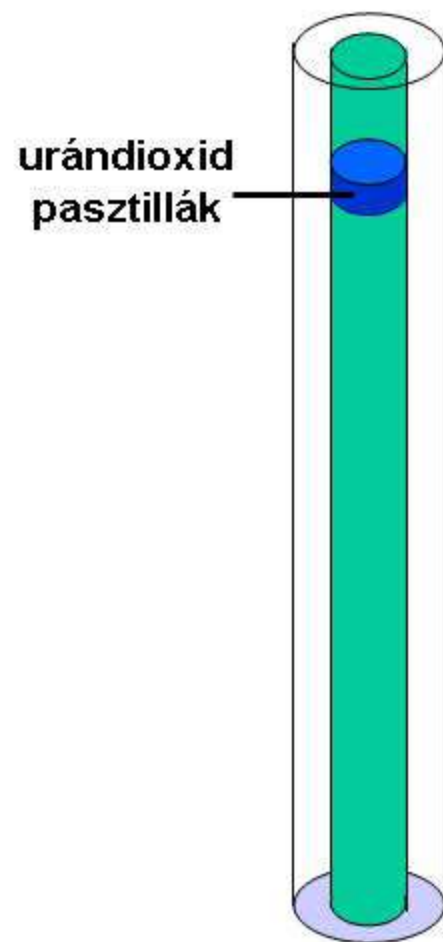
# Kiégett fűtőelemek

mi van bennük?



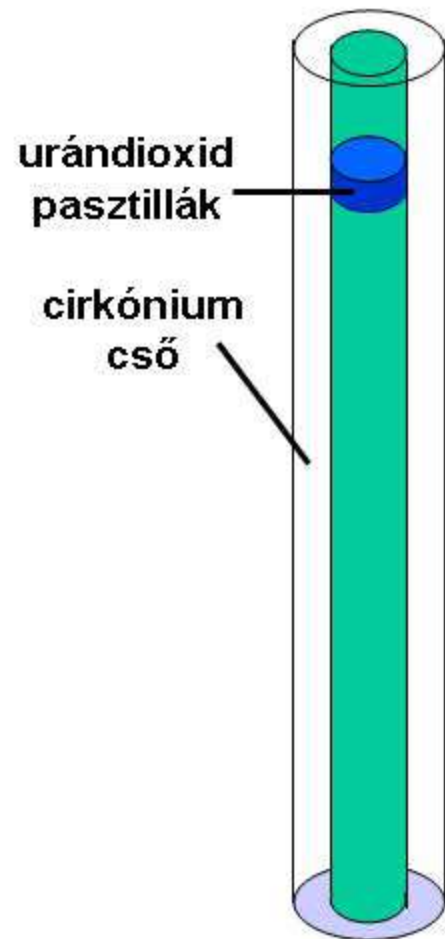
# Kiégett fűtőelemek

mi van bennük?



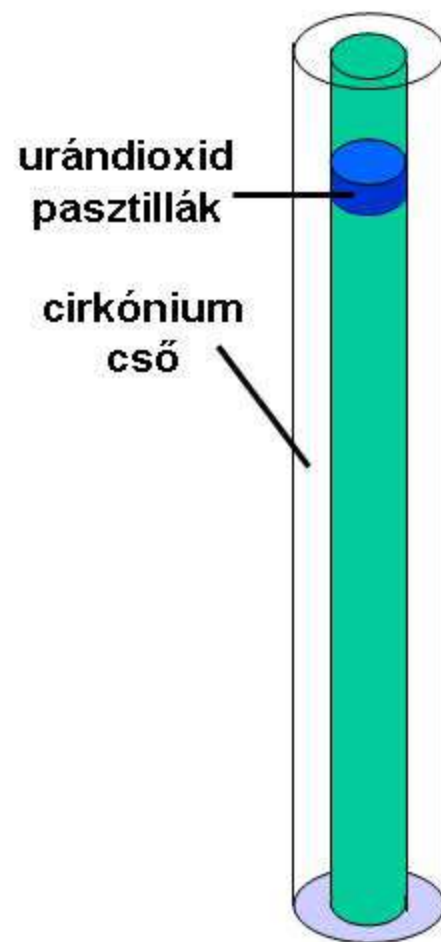
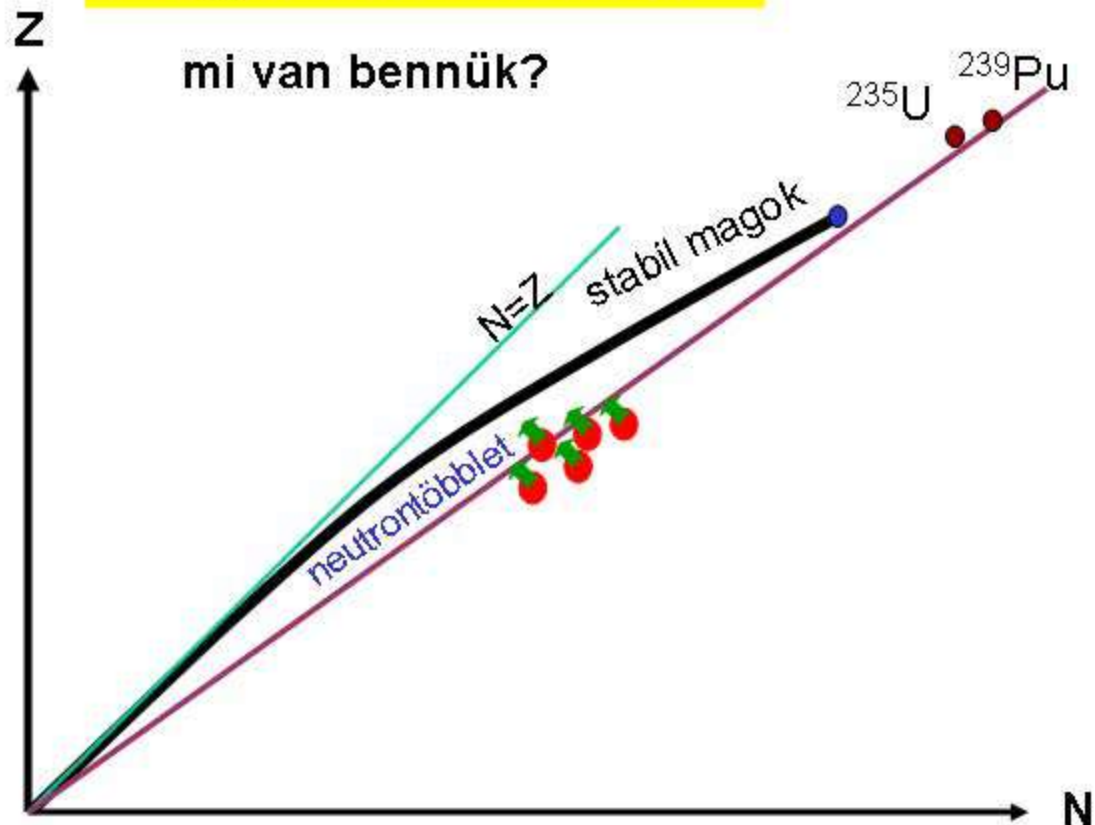
# Kiégett fűtőelemek

mi van bennük?

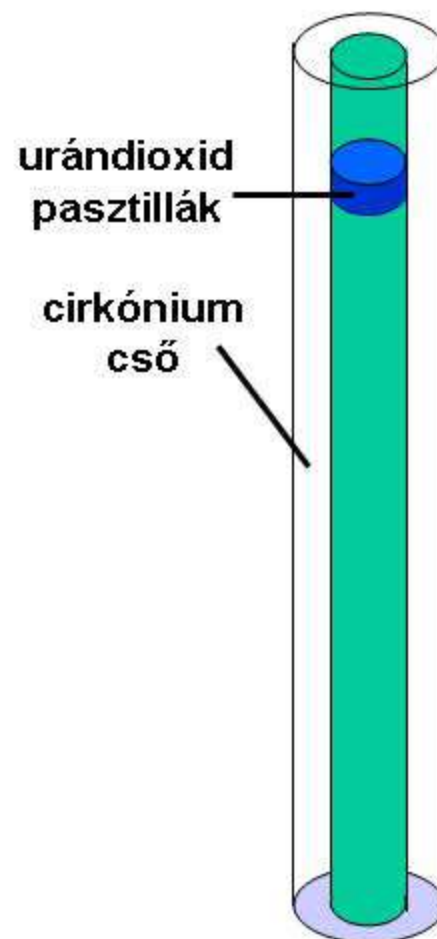
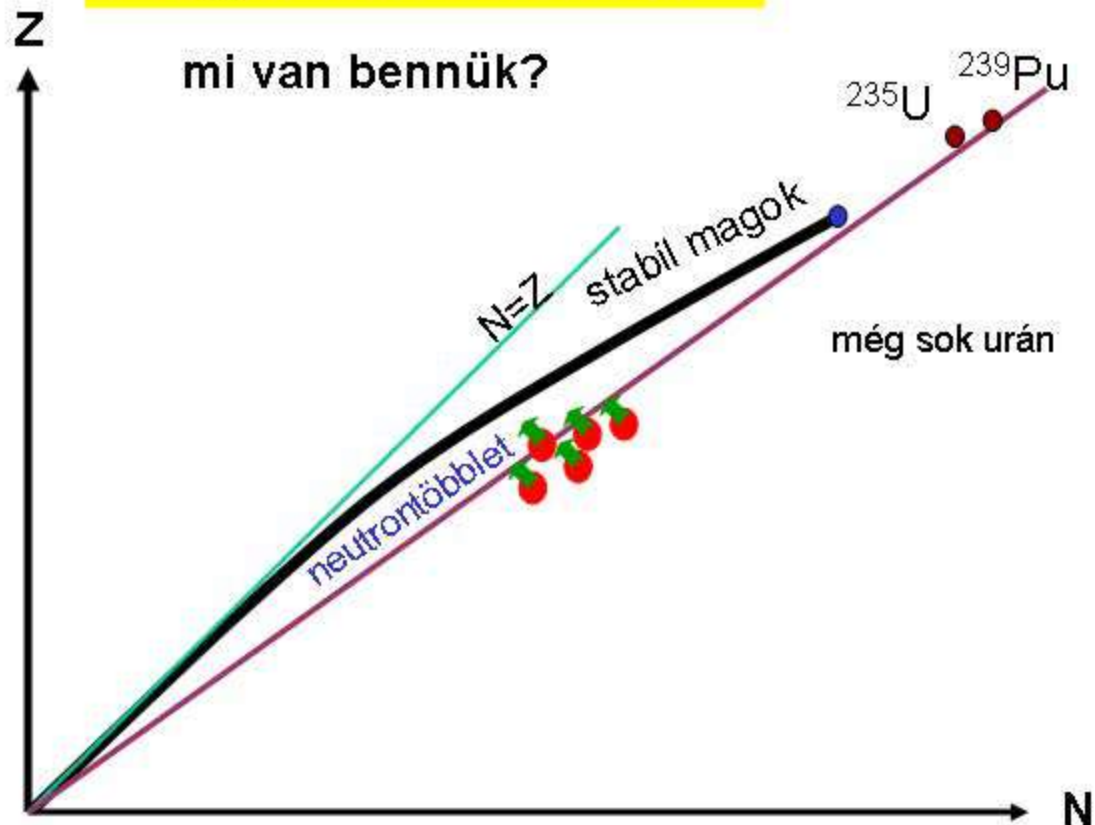




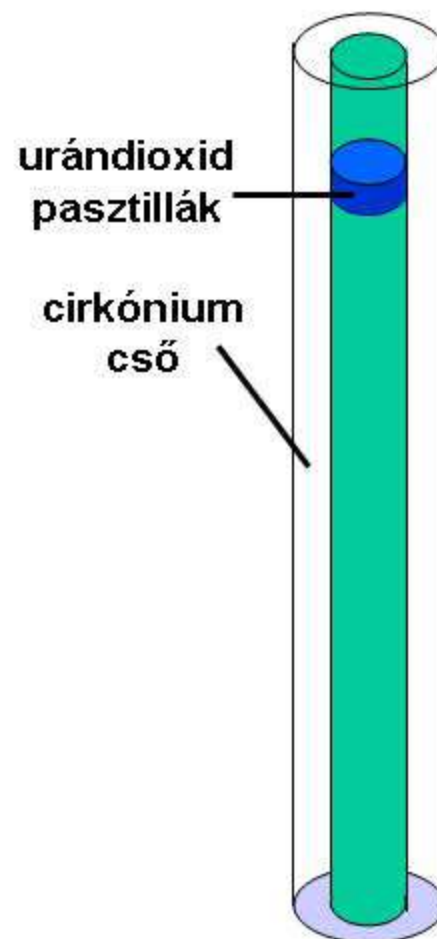
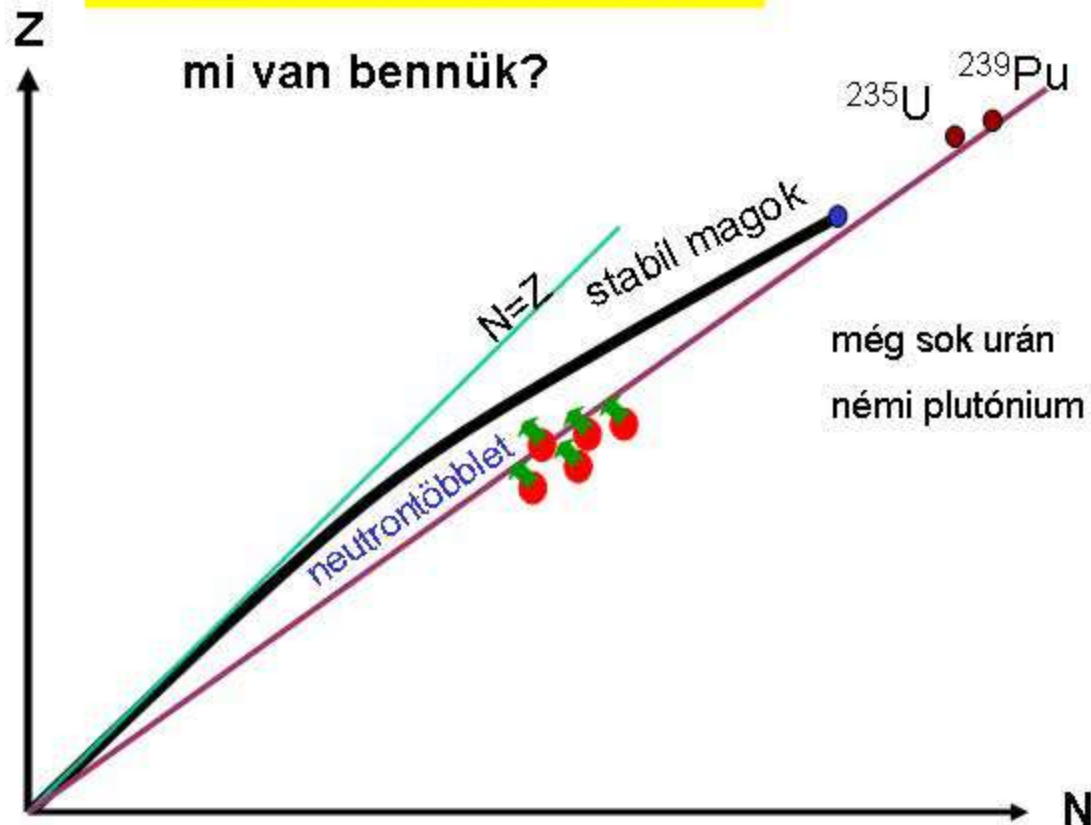
# Kiégett fűtőelemek



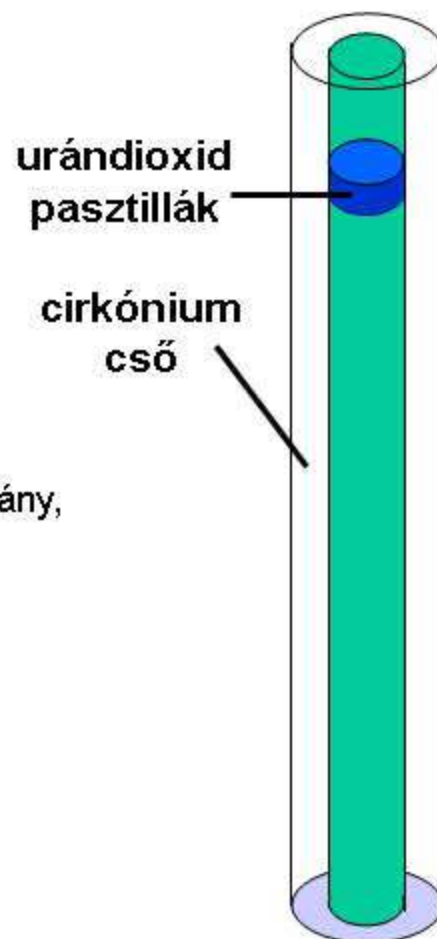
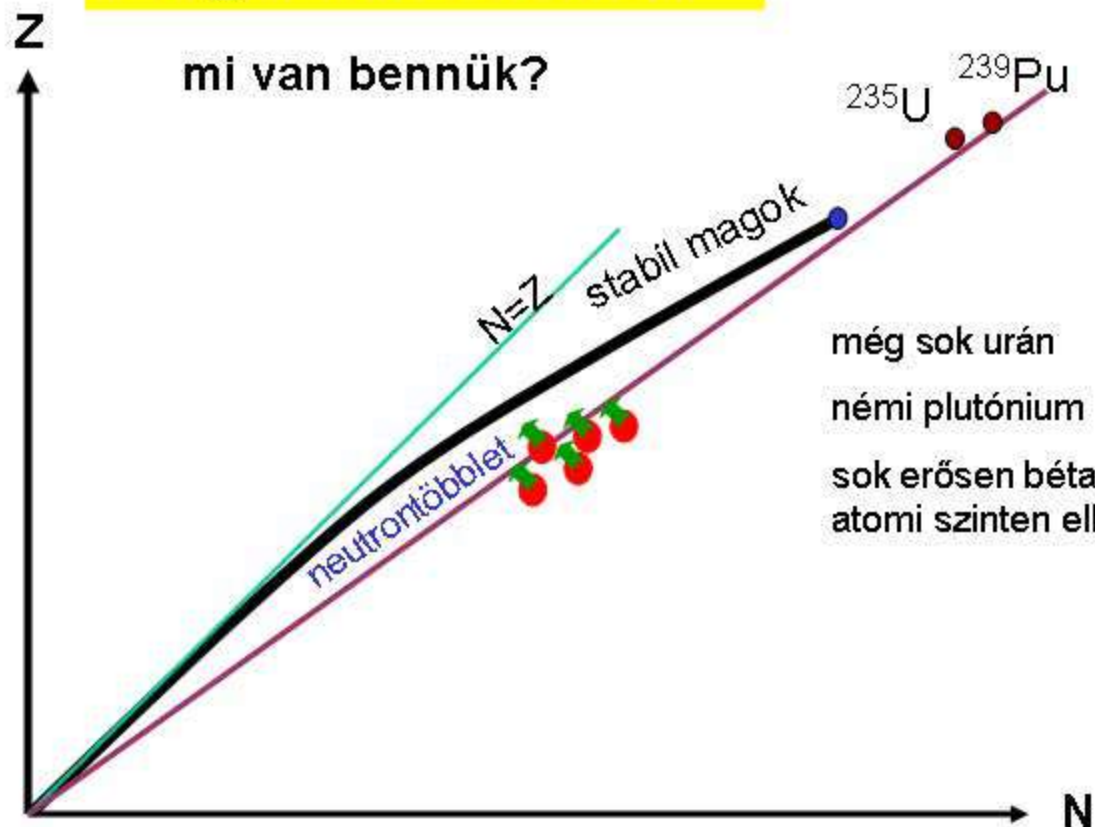
# Kiégett fűtőelemek



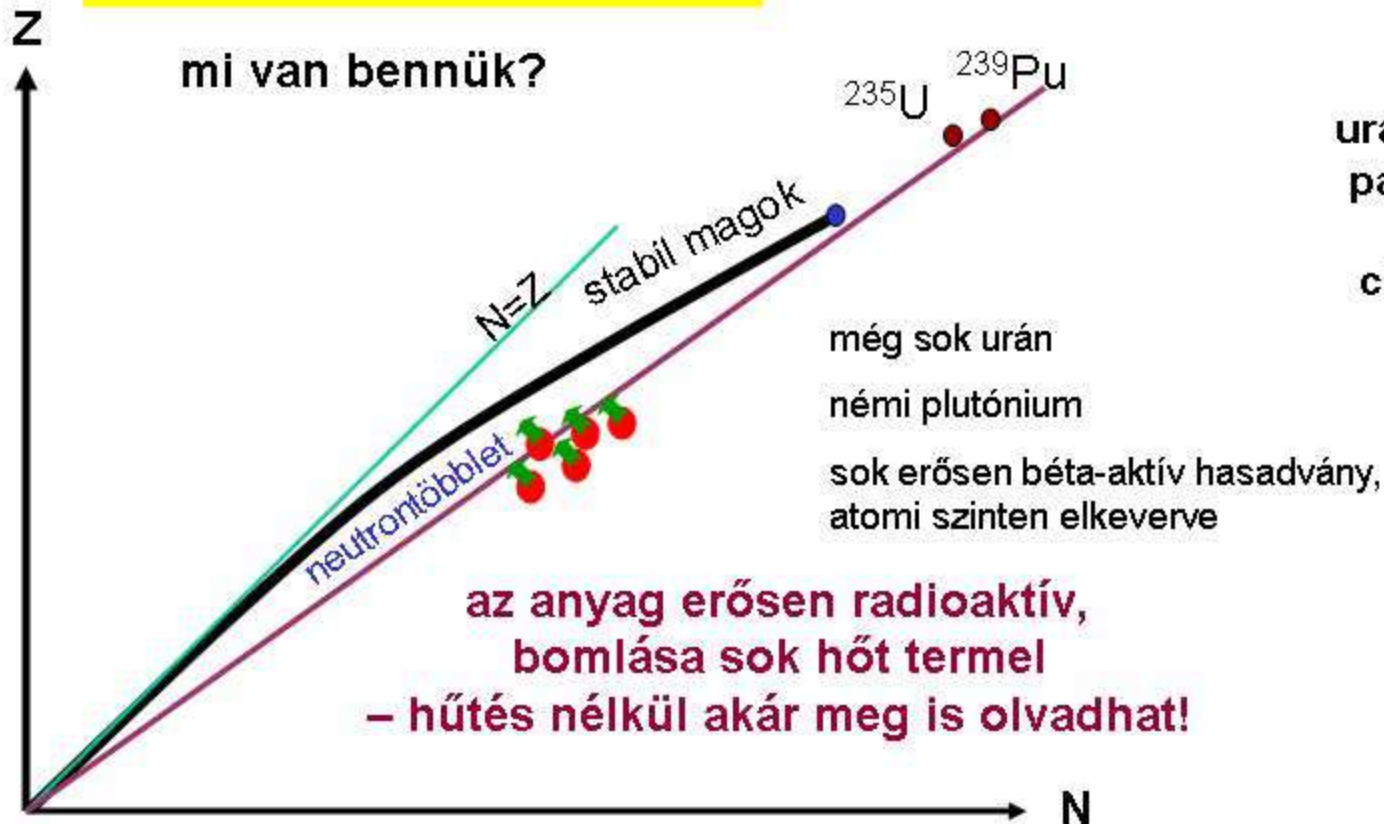
# Kiégett fűtőelemek



# Kiégett fűtőelemek



# Kiégett fűtőelemek

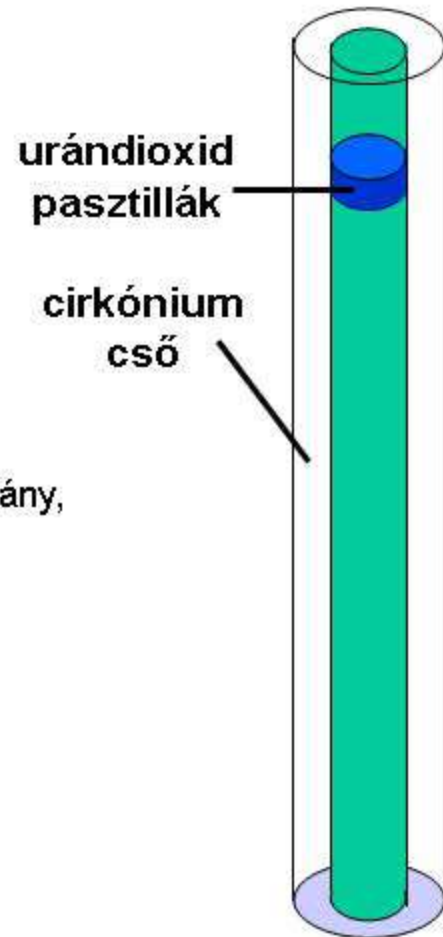
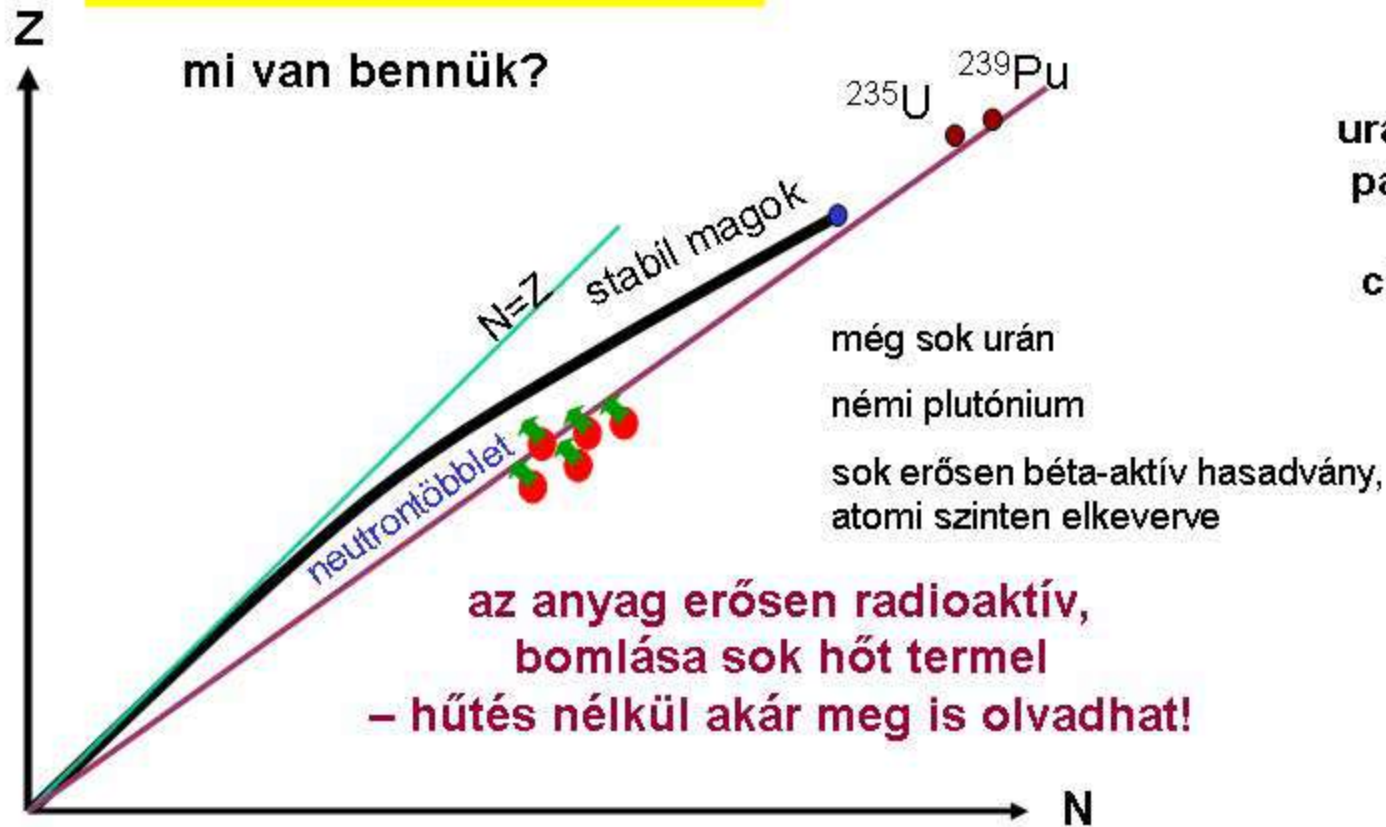


urándioxid  
pasztillák

cirkónium  
cső



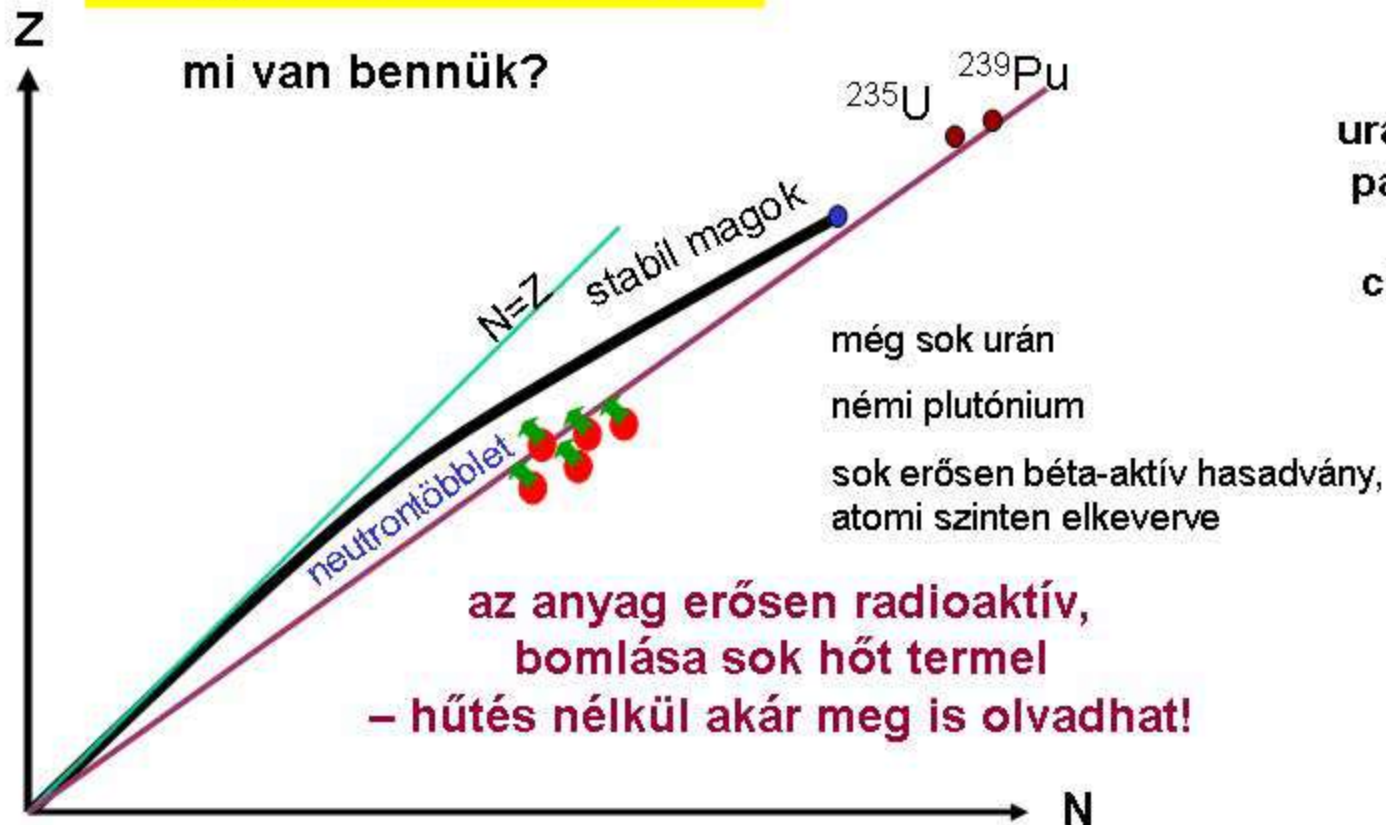
# Kiégett fűtőelemek



A rudakat vízben kell tartani, akár évekig!



# Kiégett fűtőelemek



urándioxid  
pasztillák

cirkónium  
cső

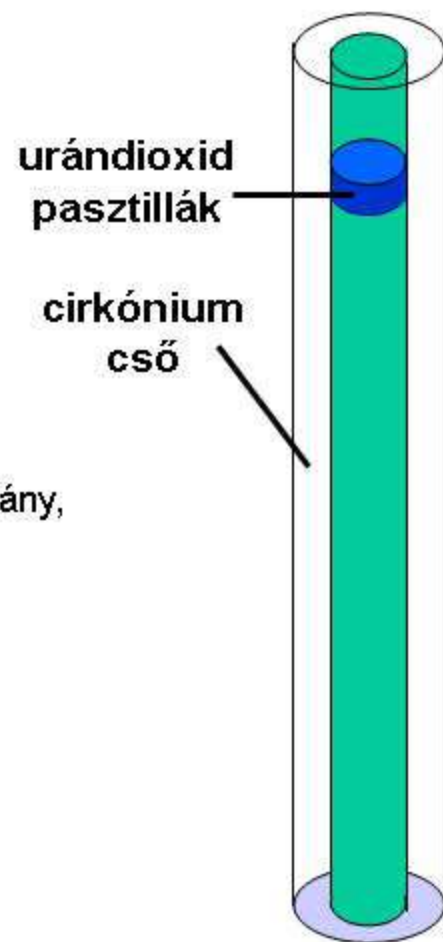
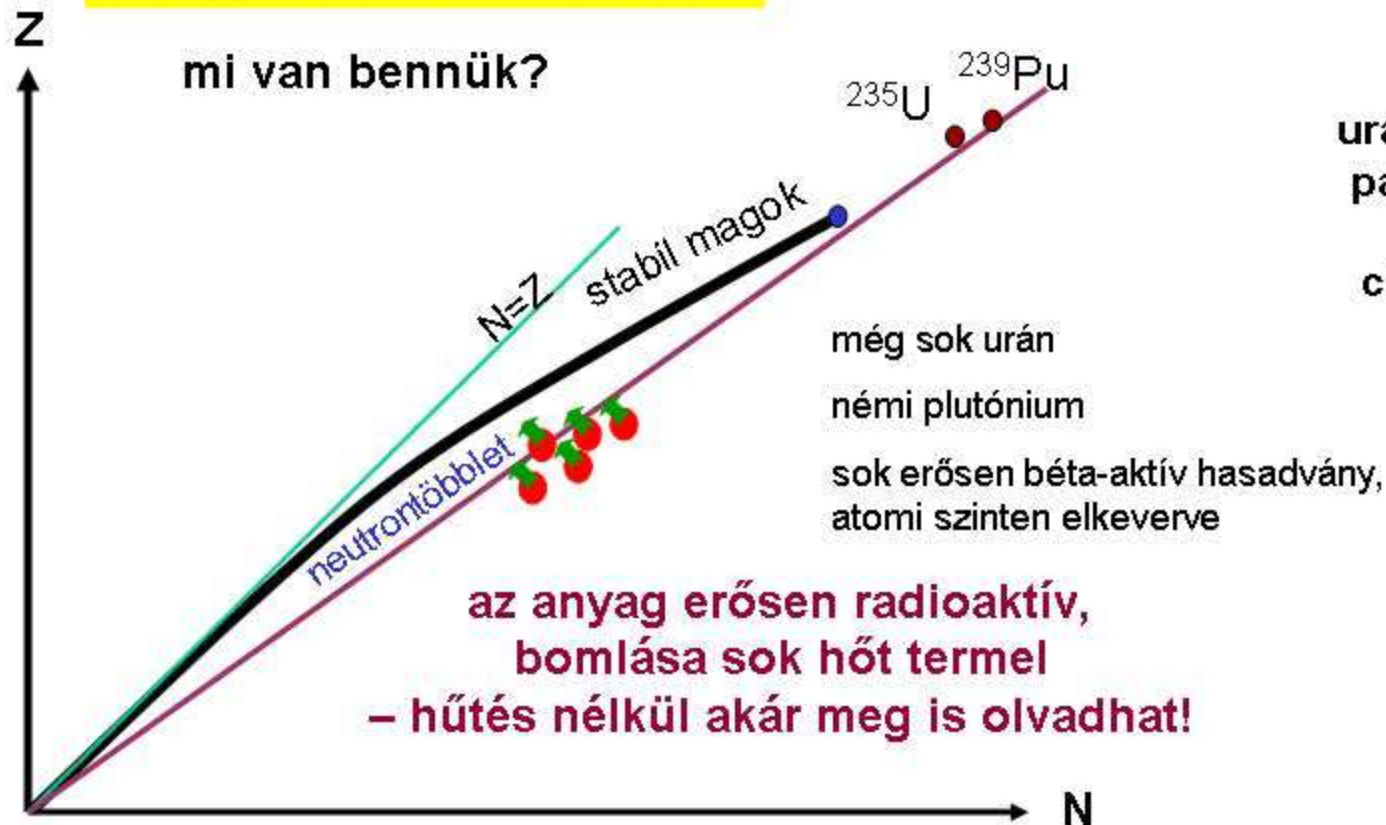


A rudakat vízben kell tartani, akár évekig!

utána



# Kiégett fűtőelemek

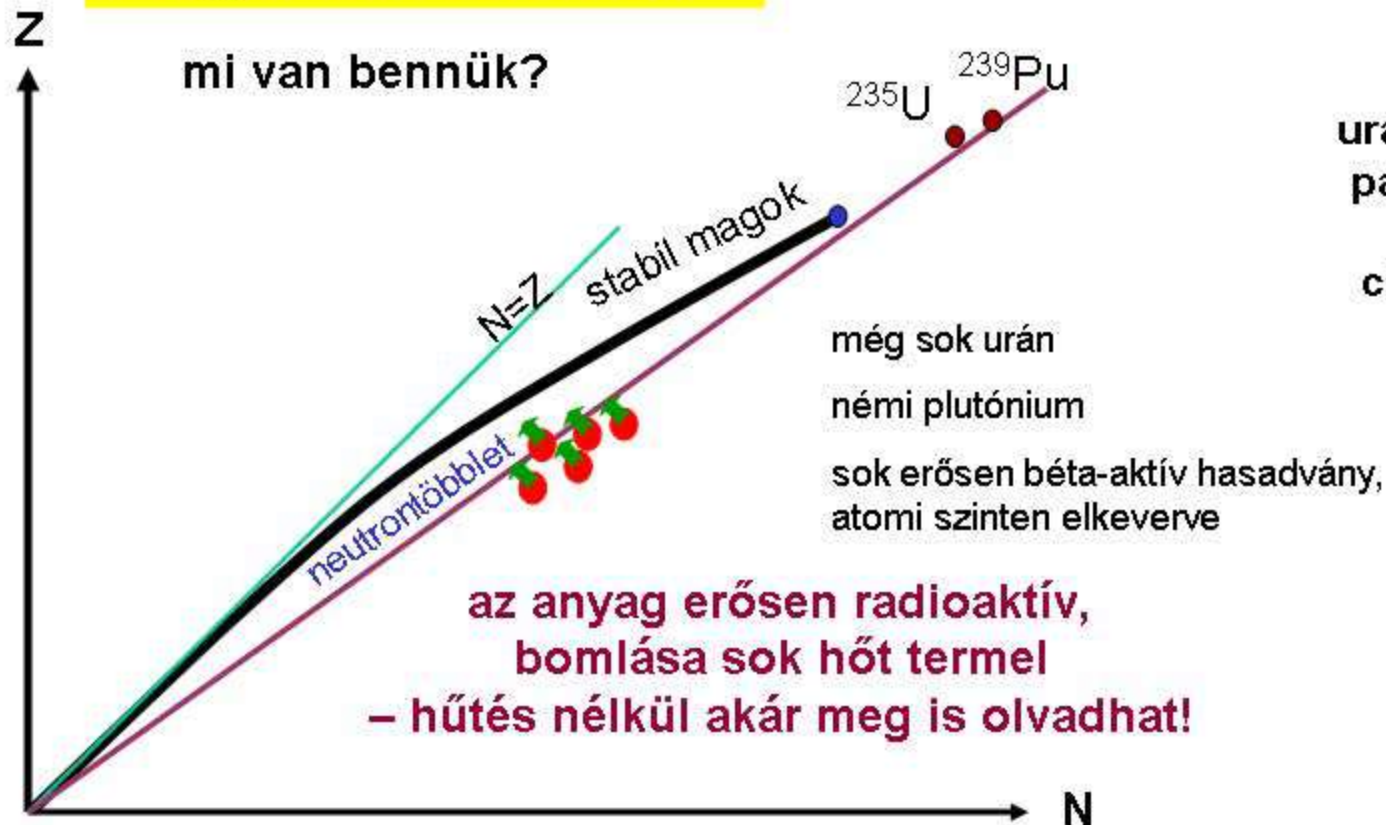


**A rudakat vízben kell tartani, akár évekig!**

utána → végleges tárolóhely, bánya mélyén



# Kiégett fűtőelemek





urándioxid  
pasztillák

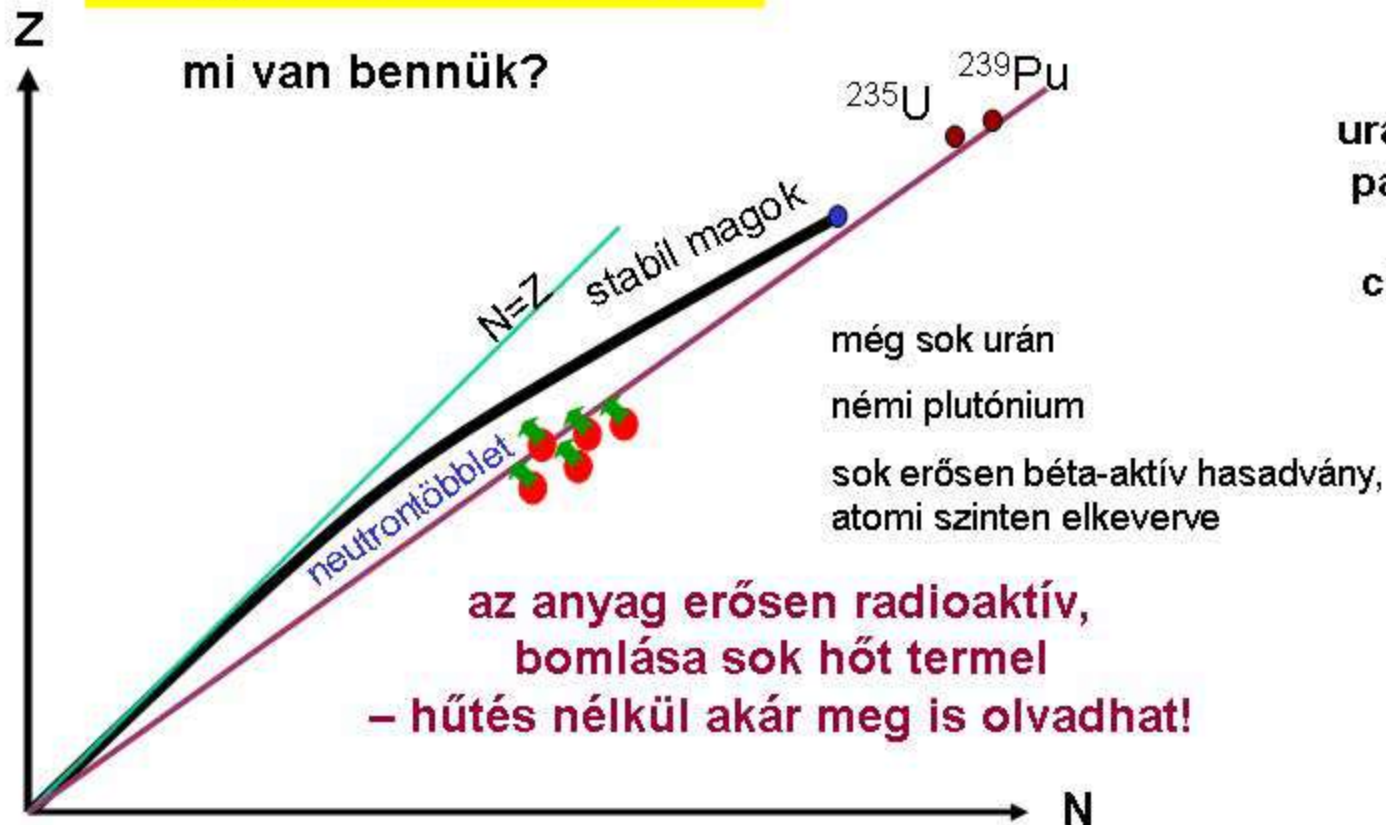
cirkónium  
cső



**A rudakat vízben kell tartani, akár évekig!**

utána  végleges tárolóhely, bánya mélyén  
 reprocesszálás, új fűtőelemek készítése

# Kiégett fűtőelemek



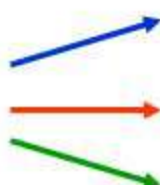
urándioxid  
pasztillák

cirkónium  
cső



**A rudakat vízben kell tartani, akár évekig!**

utána



végleges tárolóhely, bánya mélyén

reprocesszálás, új fűtőelemek készítése

transzmutáció: nem sugárzó anyaggá alakítás



**Az atomenergia nem mumus, nem ellenség.**



**Az atomenergia nem mumus, nem ellenség.**

**Akárcsak a technológia többi eredményét,  
lehet jóra és rosszra is használni.**



**Az atomenergia nem mumus, nem ellenség.**

**Akárcsak a technológia többi eredményét,  
lehet jóra és rosszra is használni.**

**Hogy felelősen dönthessünk, először is meg  
kell ismernünk, meg kell értenünk.**



