

# Részecskegyorsítók

Barna Dániel

[barna.daniel@wigner.mta.hu](mailto:barna.daniel@wigner.mta.hu)

<http://wigner.mta.hu/~barna>

Wigner Fizikai Kutatóközpont

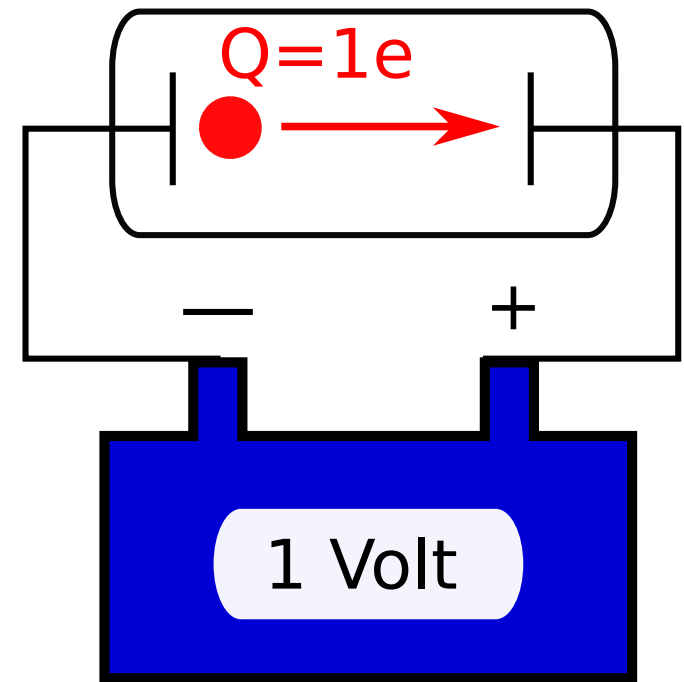
- Mértékegységek, töltött részecskék manipulálása
  - Részecskegyorsítók a mindennapi életünkben
  - Miért akarunk **nagyenergiás** gyorsítókat?
  - A klasszikus nagyenergiás gyorsítók részei és alapelvek
  - Egyéb gyorsító típusok
  - Kitekintés, tervek...
-

# Mértékegységek

## Töltött részecskék manipulálása

# Energia mértékegység

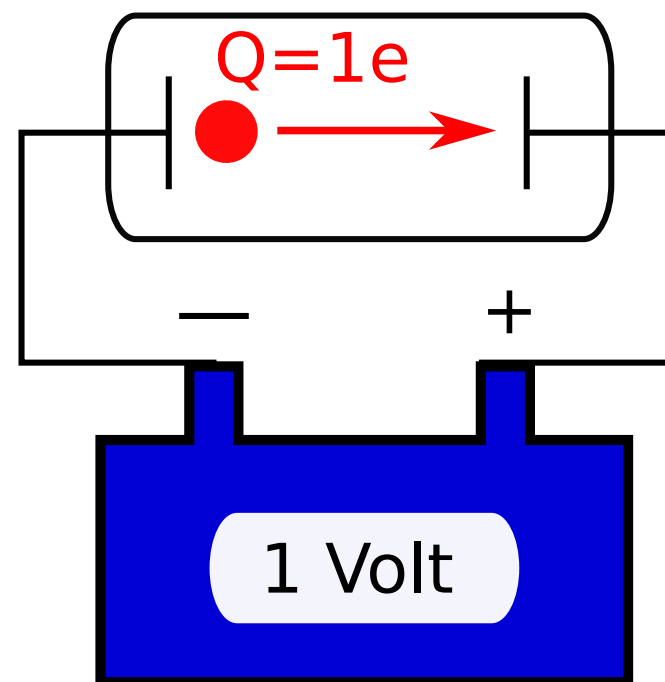
- 1 elektronvolt =  $e \cdot V$
- 1 elemi töltésű részecske 1 Volt potenciálkülönbség befutása során szerzett energiája
- eV  
keV = 1000 eV  
MeV =  $10^6$  eV  
GeV =  $10^9$  eV  
TeV =  $10^{12}$  eV



Brutálisan nagy energia...

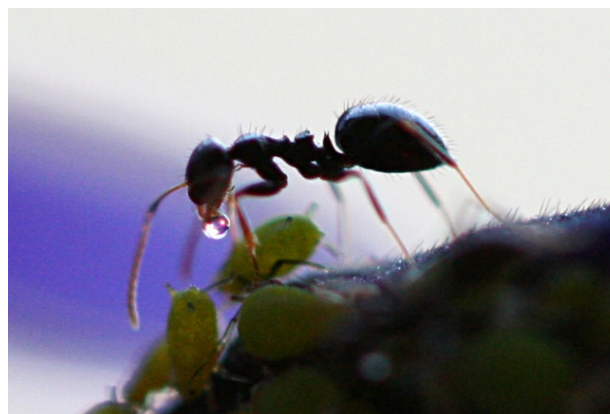
# Energia mértékegység

- 1 elektronvolt =  $e \cdot V$
- 1 elemi töltésű részecske 1 Volt potenciálkülönbség befutása során szerzett energiája
- eV  
keV = 1000 eV  
MeV =  $10^6$  eV  
GeV =  $10^9$  eV  
TeV =  $10^{12}$  eV



Egy átlagos termetű hangya helyzeti energiája ? cm magasságban

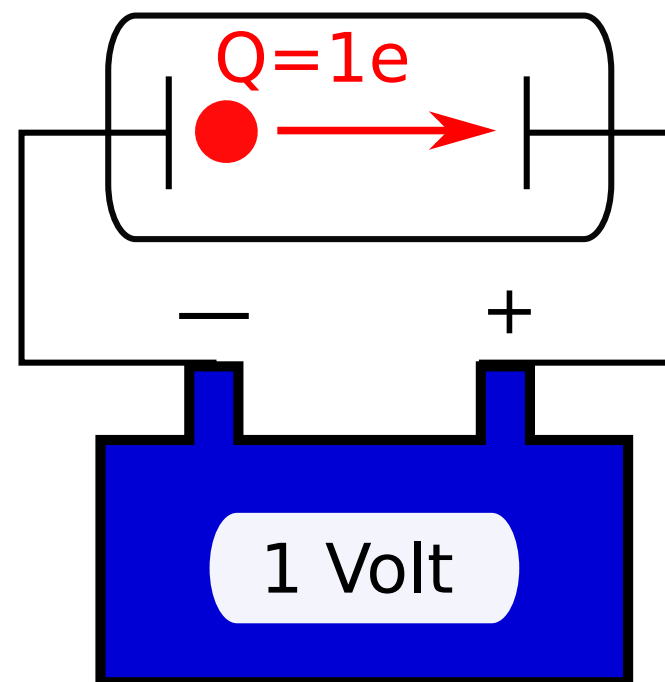
? cm





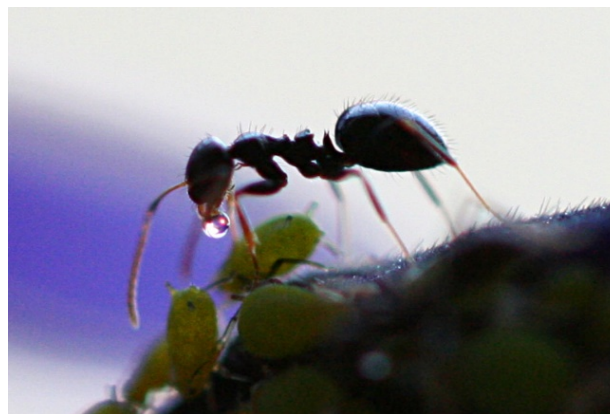
# Energia mértékegység

- 1 elektronvolt =  $e \cdot V$
- 1 elemi töltésű részecske 1 Volt potenciálkülönbség befutása során szerzett energiája
- eV  
keV = 1000 eV  
MeV =  $10^6$  eV  
GeV =  $10^9$  eV  
TeV =  $10^{12}$  eV



Egy átlagos termetű hangya  
helyzeti energiája 1 cm magasságban

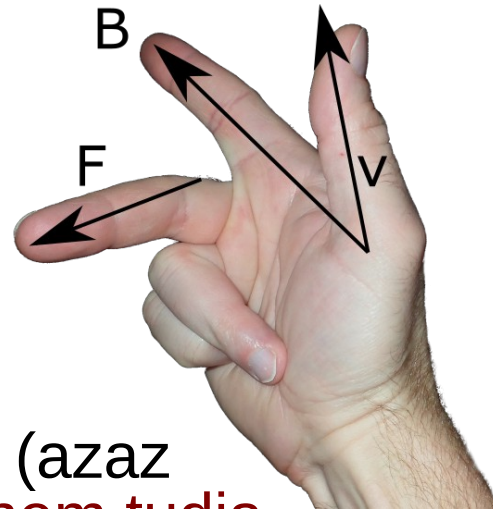
1 cm



# Töltött részecskék manipulálása

Mágneses tér:  $B$

$$F = q \vec{v} \times \vec{B}$$



- Munkát nem végez (azaz **NEM “GYORSÍT”, nem tudja növelni az energiát!!!**)
- Csak **ELTÉRÍT**
- A részecske sebességével nő, tehát nagy energián hatékony

Elektromos tér:  $E$

$$F = q \vec{E}$$

- **CSAK** az elektromos tér tud “gyorsítani” - mármint **növelni az energiát**
- Természetesen eltéríteni is tud, de..
- ..nem növekszik a részecske sebességével
- Kis energián praktikus eltérítésre, fókuszálásra

Nagy energián ( $v=c$ ): 1 Tesla  $\leftrightarrow$  300 millió Volt/méter

- Mágneseket használunk eltérítésre és fókuszálásra
- Elektromos teret gyorsításra

# Részecskegyorsítók a mindennapi életünkben, a háztartásban

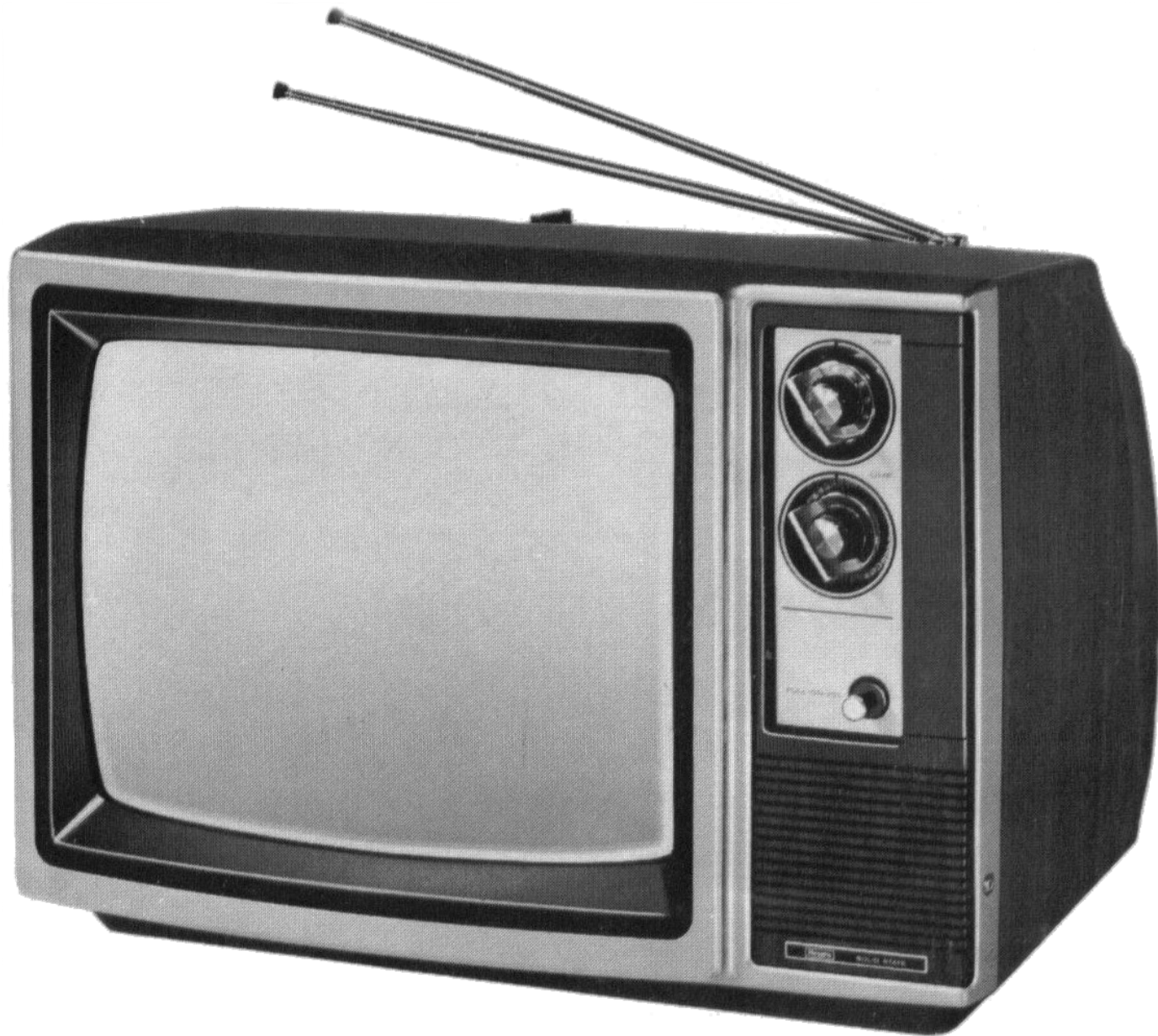
- [http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2013/talks/frzap1\\_talk.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2013/talks/frzap1_talk.pdf)

# Ezeket/őket nem nevezzük részecskegyorsítónak





# Ezt sem, pedig az: katódsugaras TV

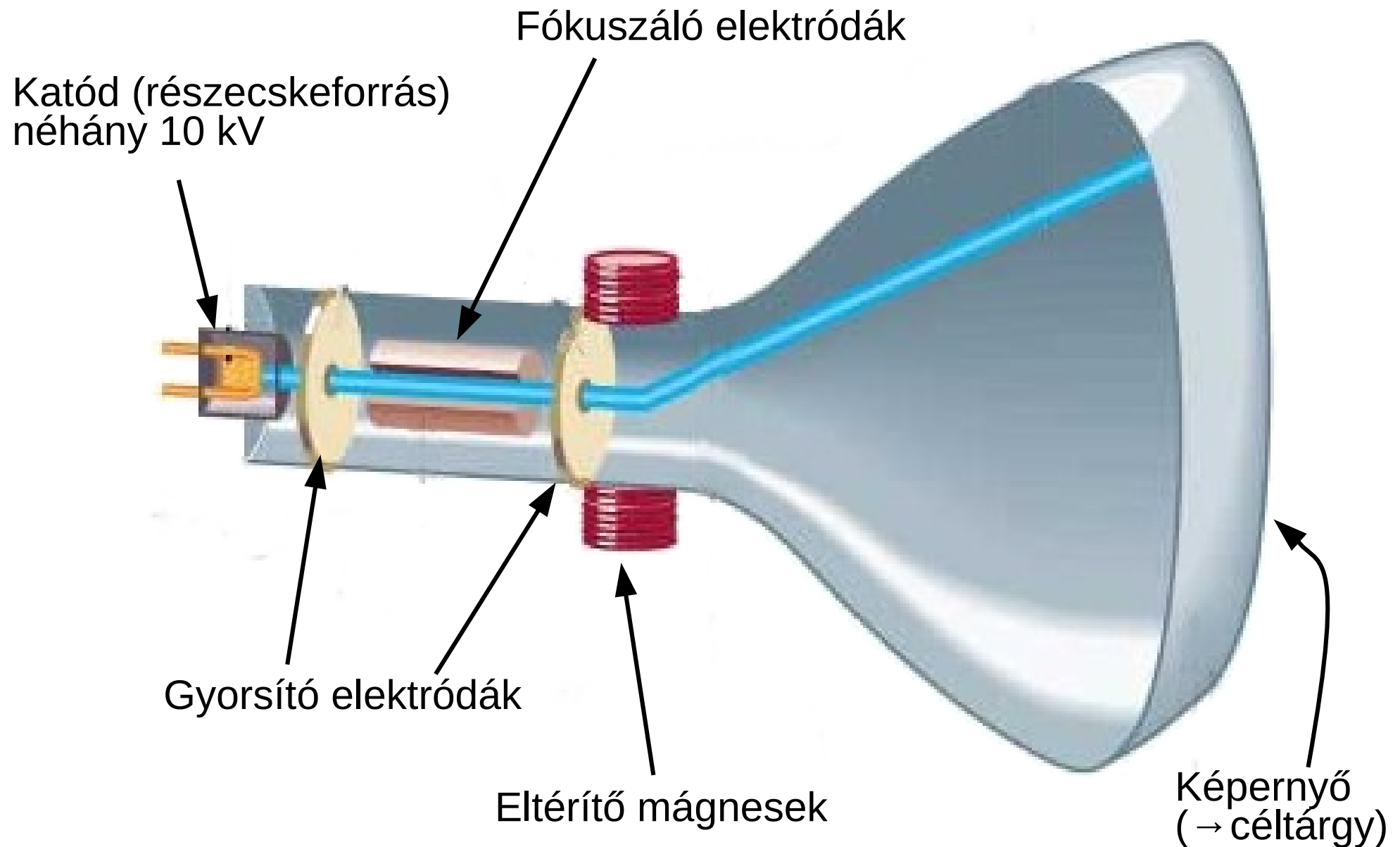


# Ezt sem, pedig az: katódsugaras TV



<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Crt14.jpg>

# Ezt sem, pedig az: katódsugaras TV

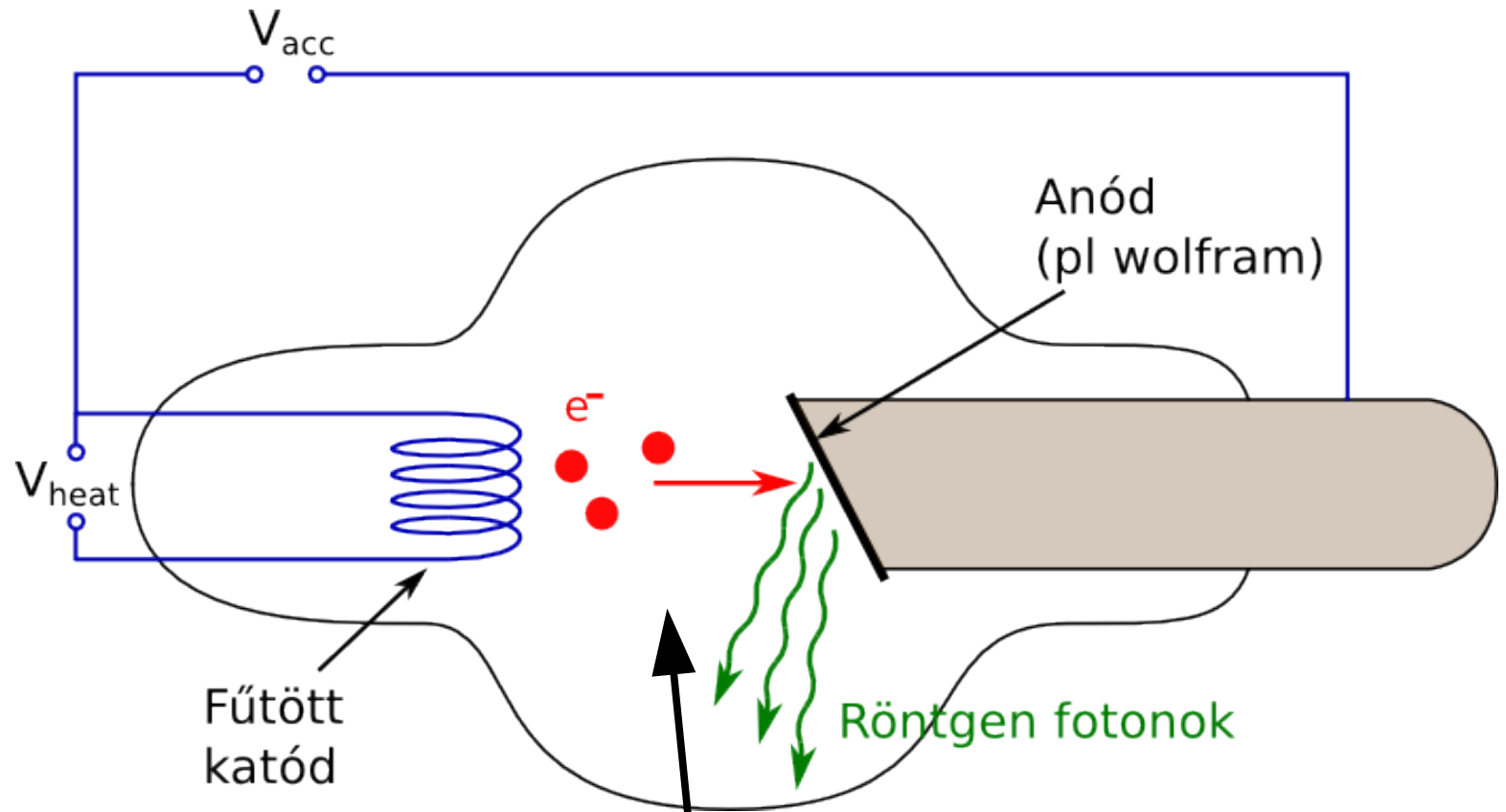


# Katódsugaras TV

- Ne dobjuk ki a régi TV-t, vigyük be a fizika szertárba!
- Ki tudja meddig találunk még ilyen egyáltalán
- Olcsó és nagyon tanulságos szemléltetőeszköz
- Egy erős mágnessel (pl. rossz merevlemezből lehet kiszerezni) lehet demonstrálni a mágneses tér hatását az elektronokra

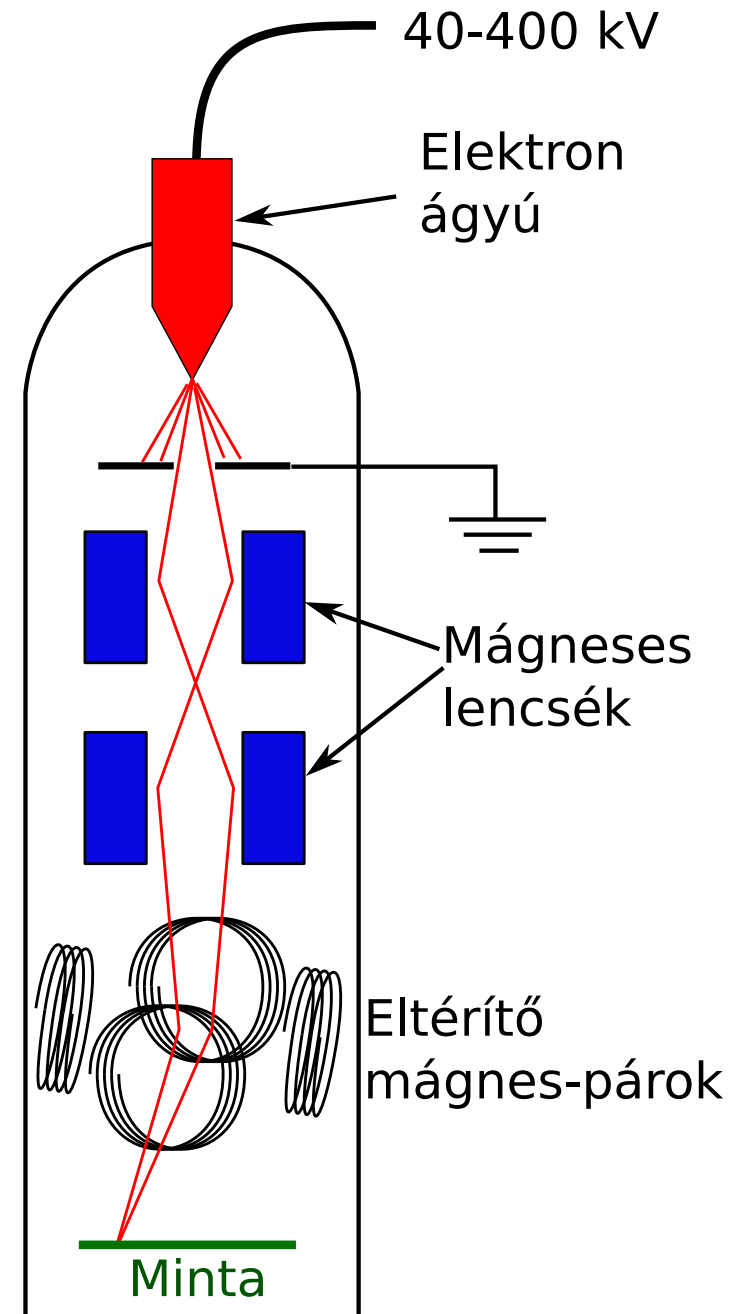


# Röntgen-cső

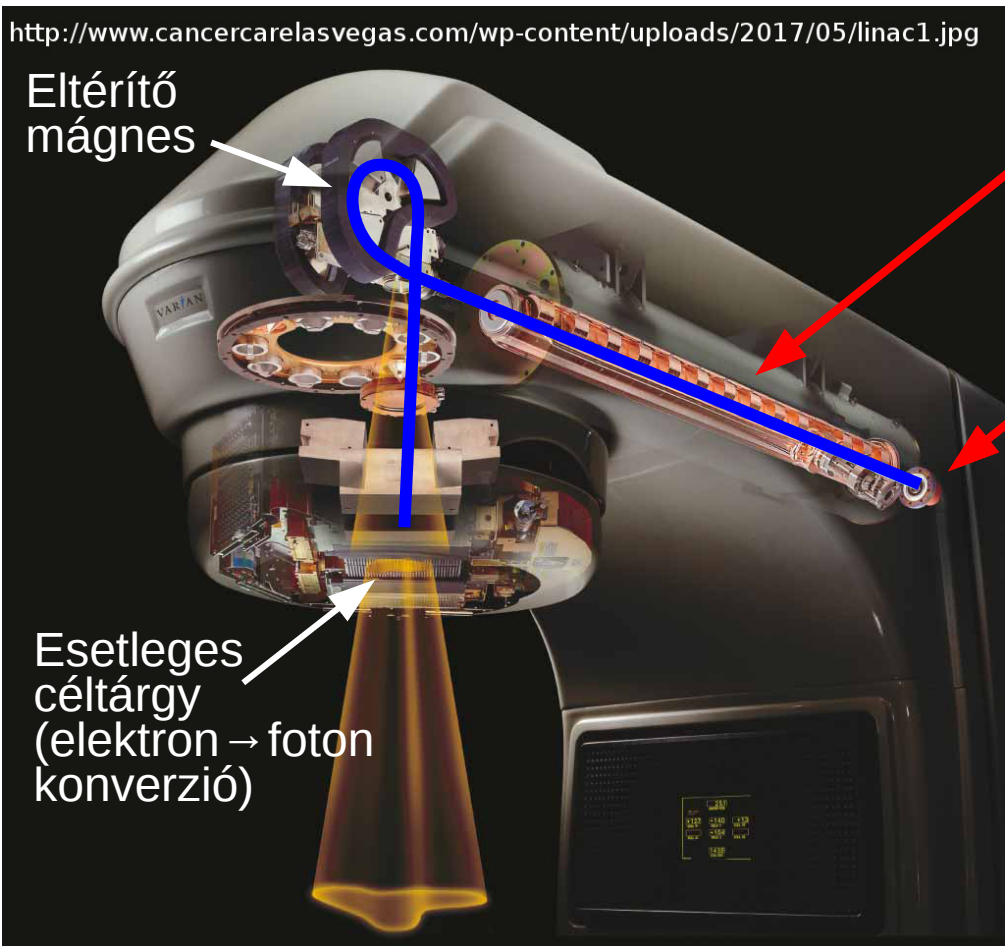


10-100 keV mini  
elektrosztatikus  
elektron-gyorsító

# Elektron mikroszkóp



# Orvosi alkalmazás: fotonterápia



Lineáris gyorsító (linac)

Részecskeforrás (elektronágyú)





# Orvosi alkalmazás: protonterápia

Proton  
Therapy  
Center

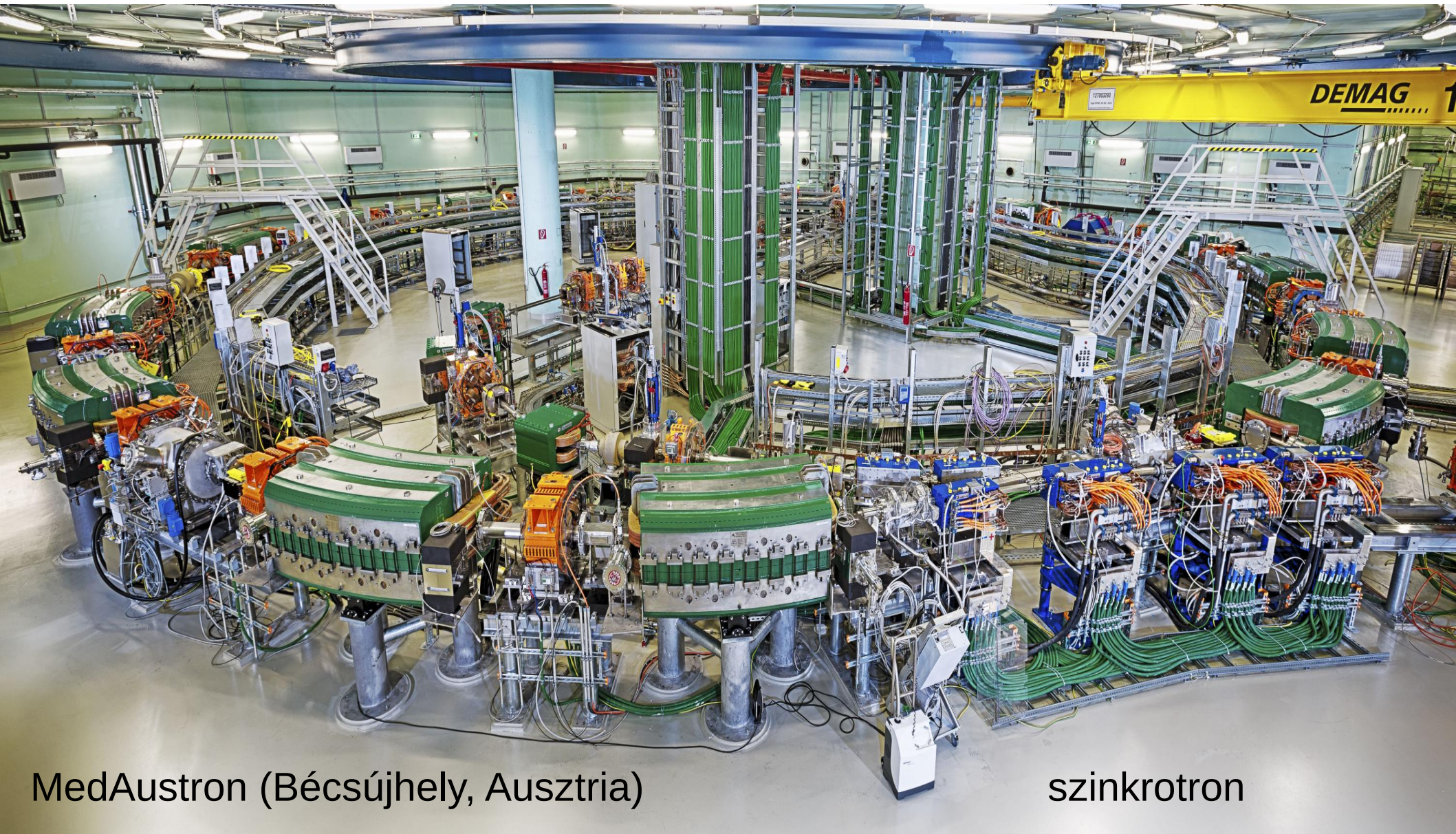
Prága



Ciklotron



# Orvosi alkalmazás: hadronterápia (p, C)



MedAustron (Bécsújhely, Ausztria)

szinkrotron



# Anyagvizsgálat



## Wigner Fizikai Kutatóközpont

- 5 MeV-es protonnyaláb
- Eredetiségvizsgálat
- Rejtett rétegek felfedezése
- Anyagösszetétel vizsgálata

# Félvezetőgyártás, ion implantáció



# Részecskegyorsítók felhasználása világszerte

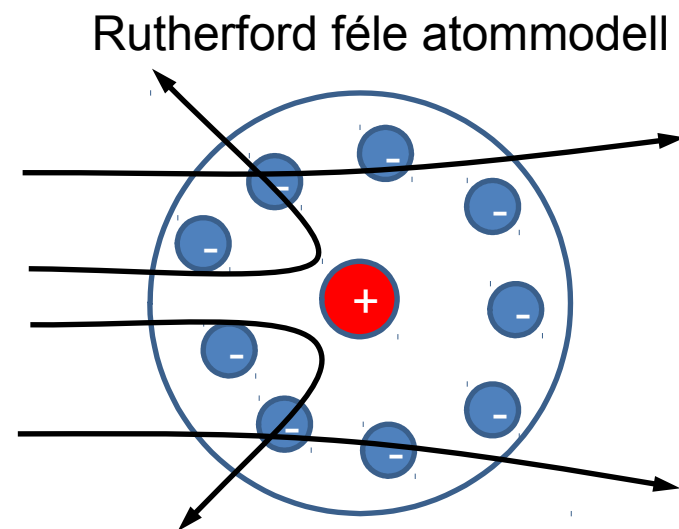
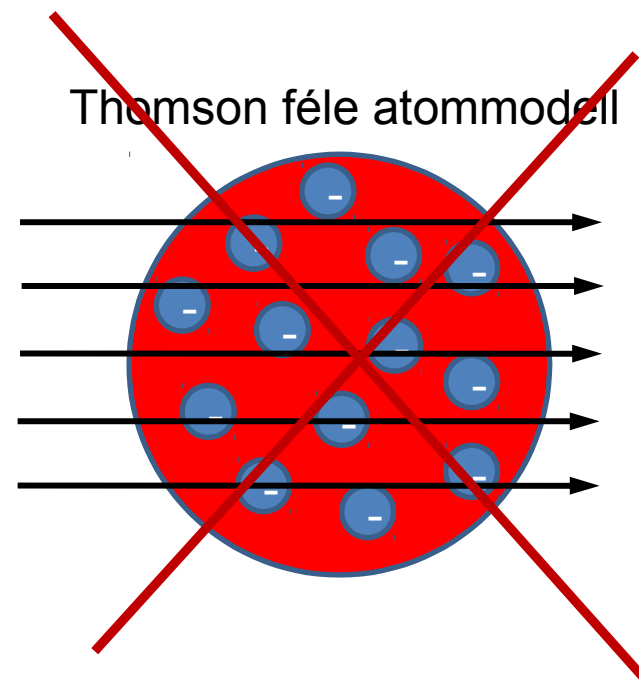
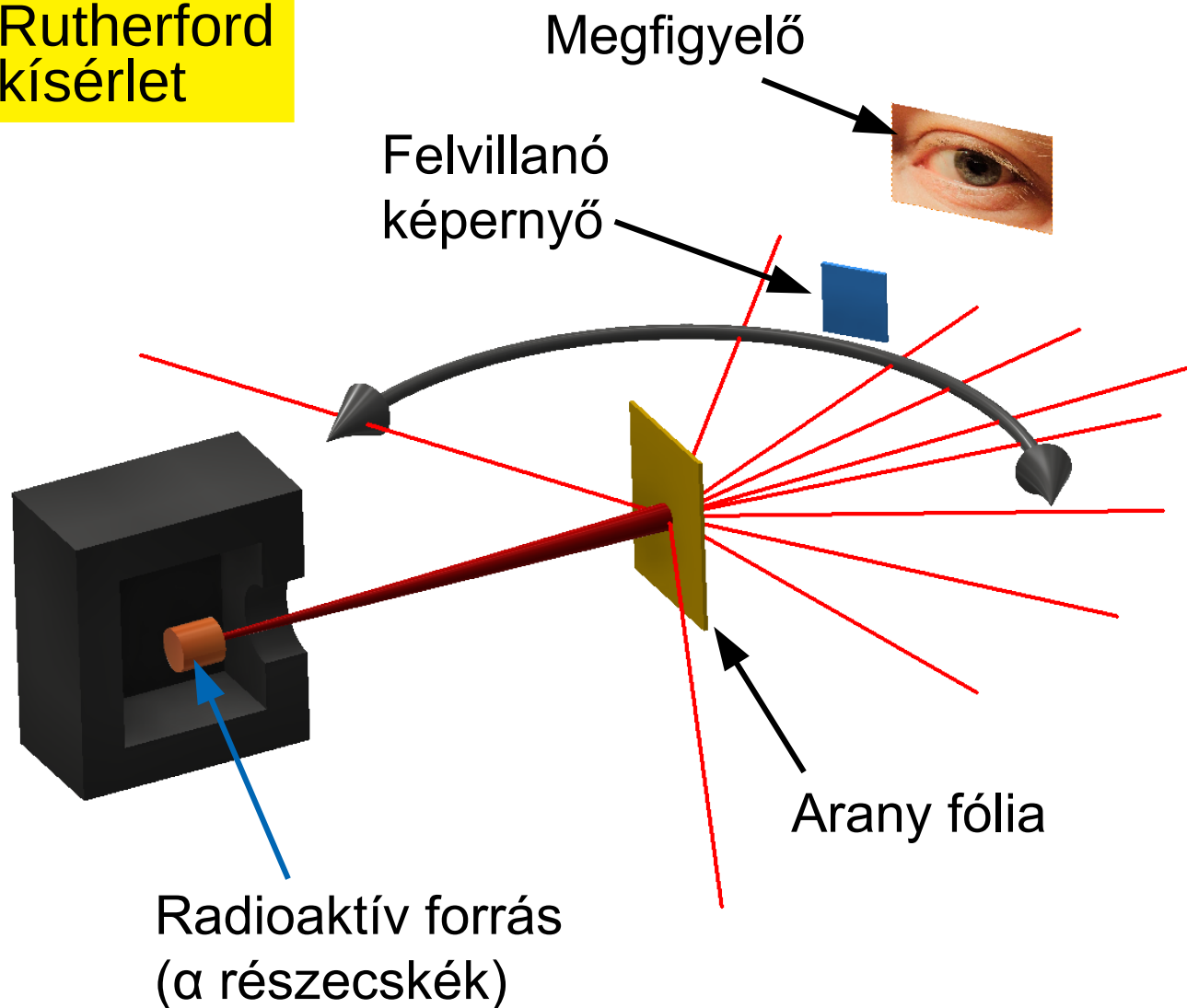
- Világszerte kb. 26000 részecskegyorsító üzemel
- 44% sugárterápiás kezelés (60-250 MeV)
- 41% ion implantáció (~ 100 keV nagyságrend), pl
  - félvezető gyártás (számítógépek, mikroelektronika)
  - fém felületkezelés (pl nitrogén implantáció) késekbe, fűrőhegyekbe
- ipari alkalmazás, kutatás
- élelmiszeripar (fertőtlenítés, tartósítás, csomagolás)
- orvosbiológiai alkalmazás, kutatás
- orvosi rádióizotóp gyártás
- 1% nagyenergiás (>1 GeV) fizika
  - Energia világcsúcstartó: LHC 14 TeV (7+7 TeV)



# Miért akarunk nagyenergiás gyorsítókat?

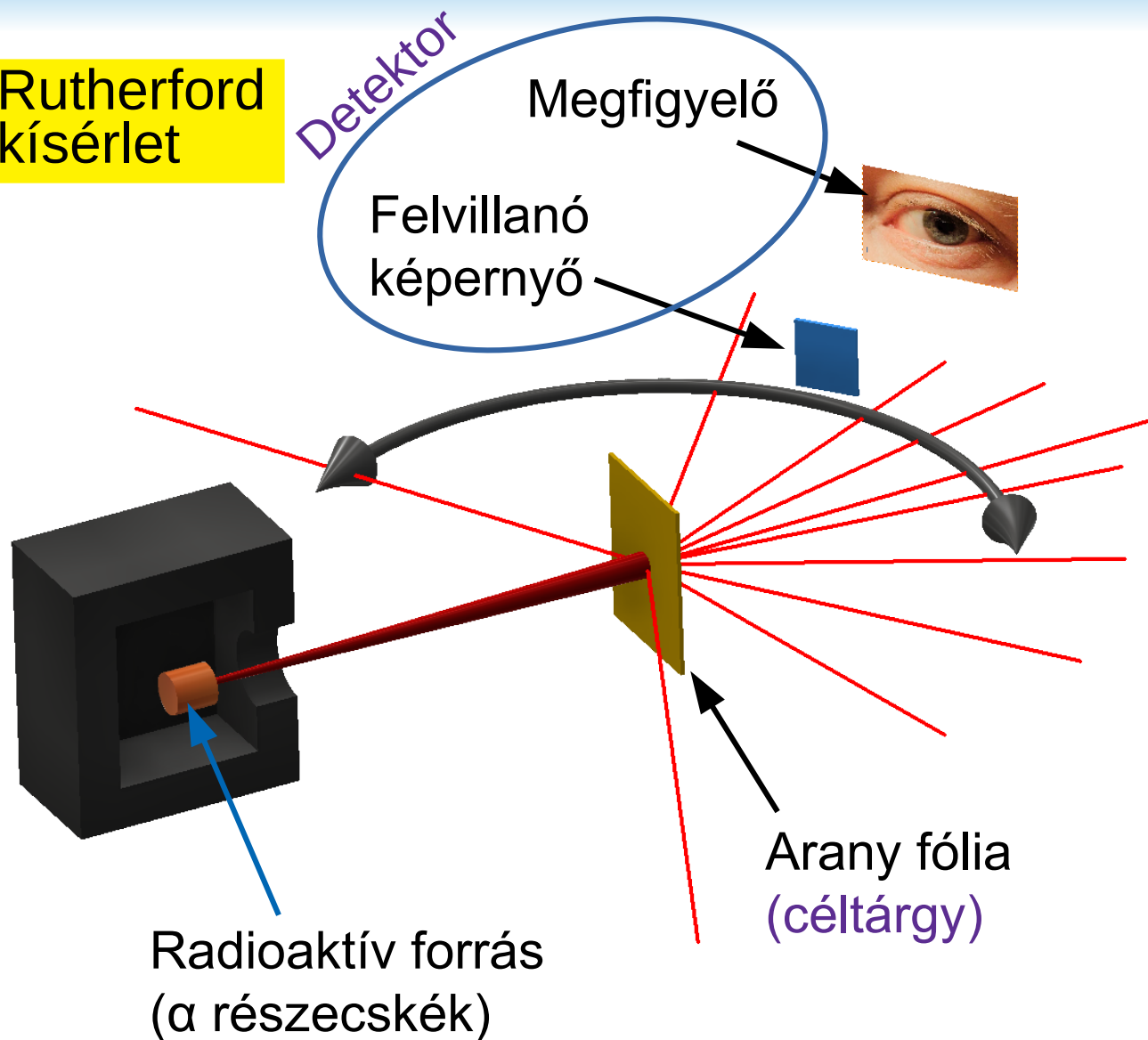
# A részecskefizika hajnala

## Rutherford kísérlet



# A részecskefizika hajnala

Rutherford kísérlet

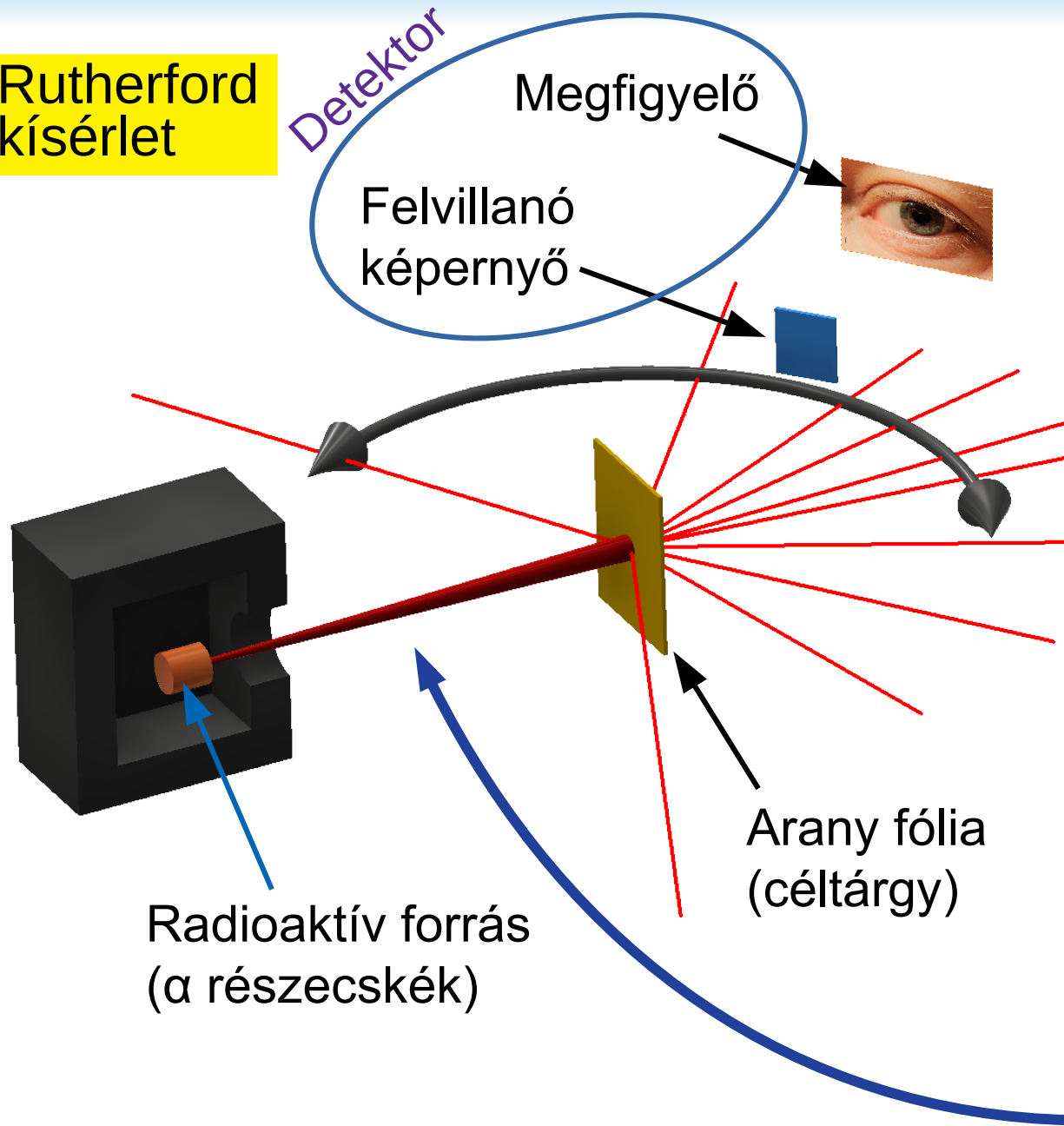


A mai részecskefizikai kísérletek szinte minden eleme megtalálható volt...

Mi hiányzott mégis?

# A részecskefizika hajnala

Rutherford kísérlet



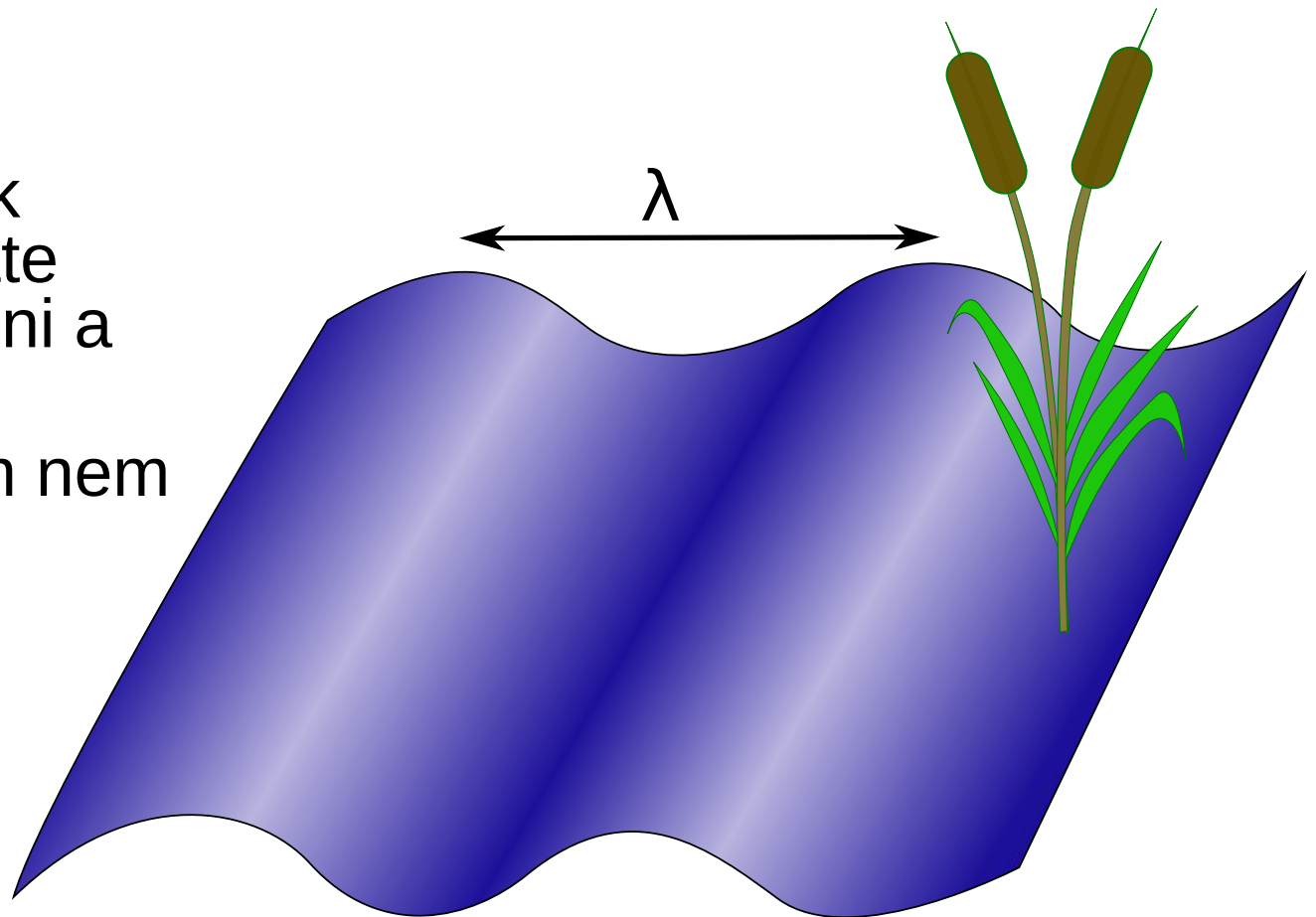
Rutherford (1927):  
„Szükségünk van egy 10 millió volt körüli feszültség előállítására képes berendezésre, [.....] Szükségünk van továbbá egy vákumcsőre, amiben ez a feszültség előállítható.... „

magyarul: kéne egy részecskegyorsító ide...

# Apropó mikroszkóp....

A mikroszkóp felbontását a használt fény (vagy általában: sugárzás) hullámhossza limitálja.

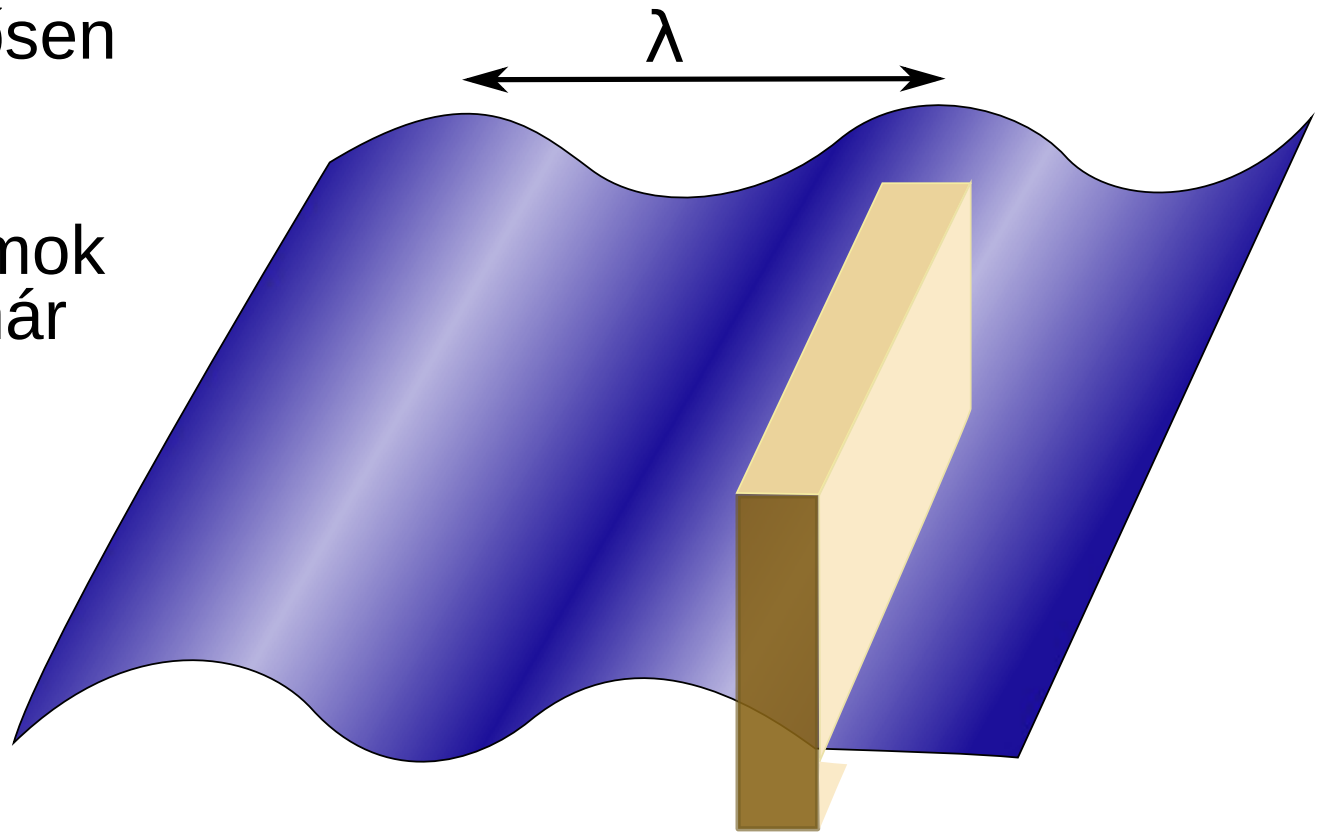
- Nádszál  $\ll \lambda$
- A nádszál “nem sok vizet zavar”, mögötte nem fog megváltozni a hullámforma
- Ez a hosszú hullám nem alkalmas a kis objektumok feltérképezésére



# Apropó mikroszkóp....

A mikroszkóp felbontását a használt fény (vagy általában: sugárzás) hullámhossza limitálja.

- $F_{\text{al}} \approx \lambda$
- A fal mögött jelentősen megváltozik a hullámforma
- Ekkora ( $\lambda$ ) objektumok feltérképezésére már használható ez a hullám

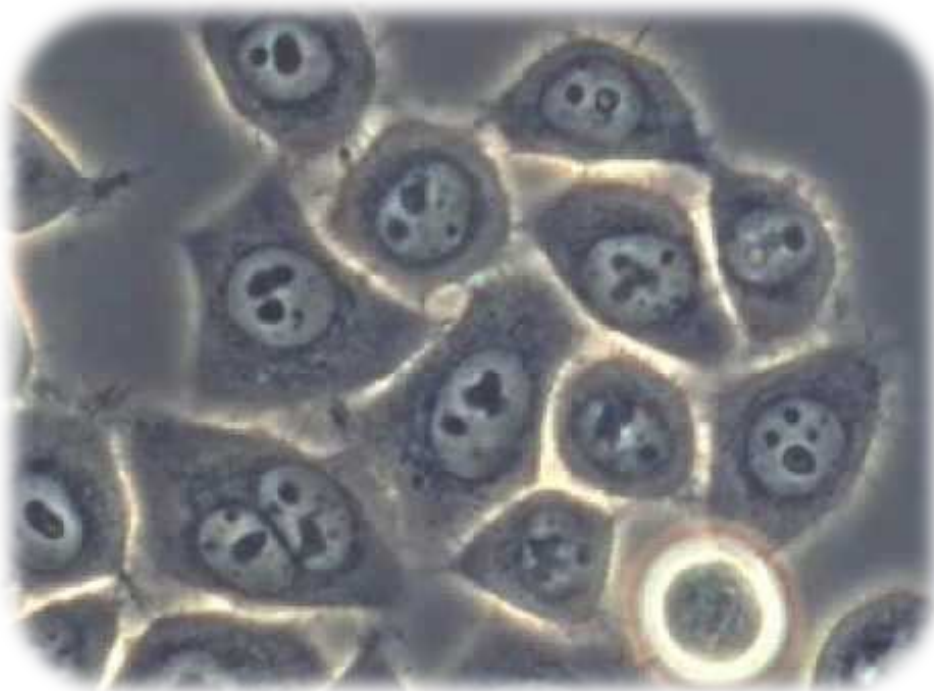


# Apropó mikroszkóp....

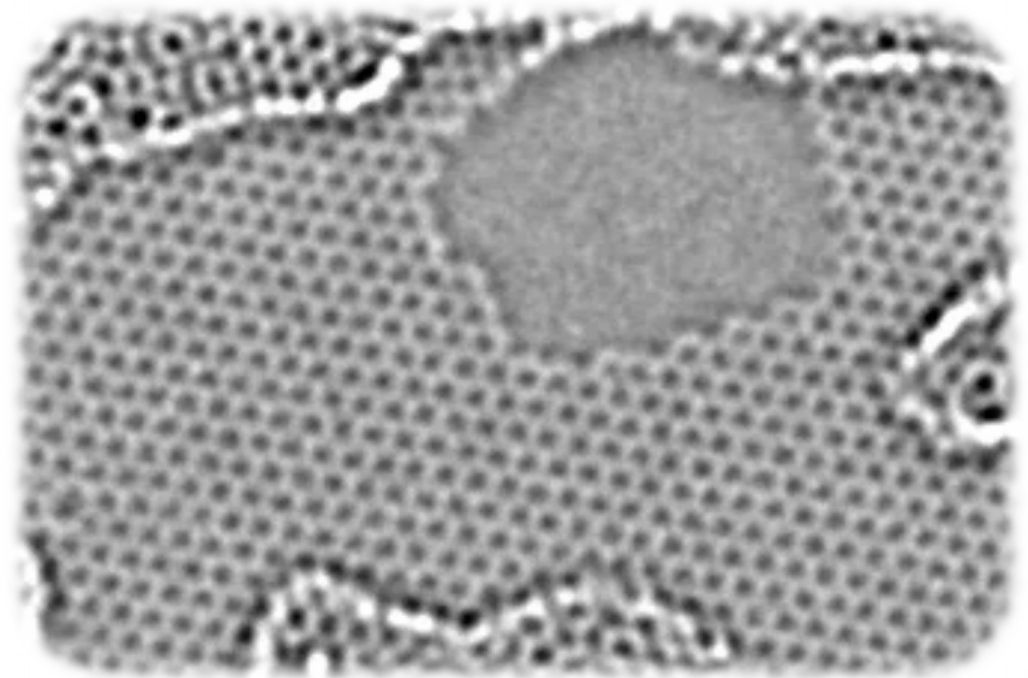
de Broglie összefüggés:  $\lambda = \frac{h}{p}$

Nagyobb energia  $\rightarrow$  rövidebb hullámhossz  $\rightarrow$  nagyobb felbontás

Fény: pár száz nm  
pl sejtek

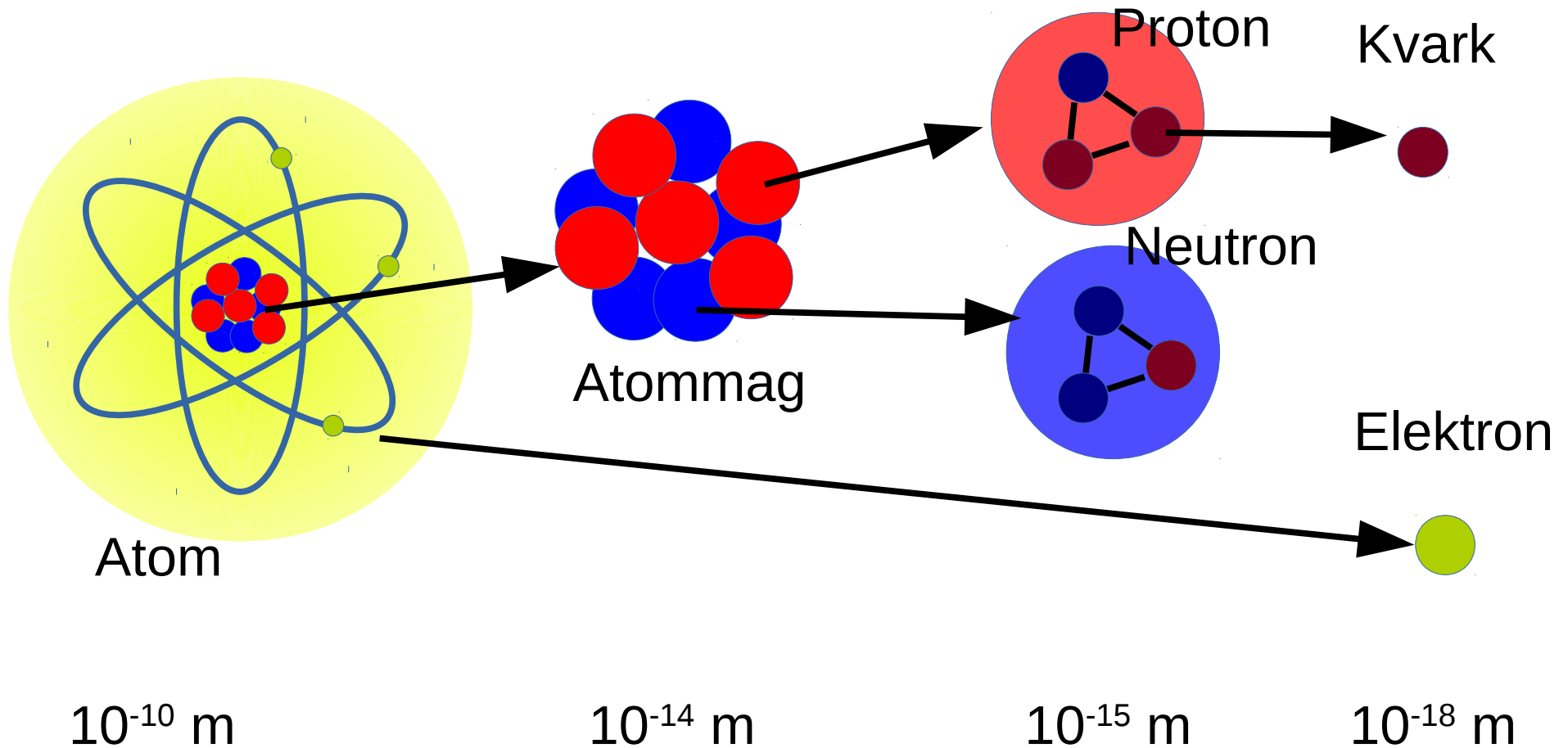


Elektronok: 100 pm alatt  
atomok





# Mit látunk még nagyobb energiájú hullámokkal? (azaz: mi van még kisebb skálán?)





# Mi másért kell nagy energia – új részecskék keltése

$$E = m c^2$$

Minél nagyobb energia áll rendelkezésünkre -

annál nagyobb tömegű új, eddig nem látott részecskéket fedezhetünk fel

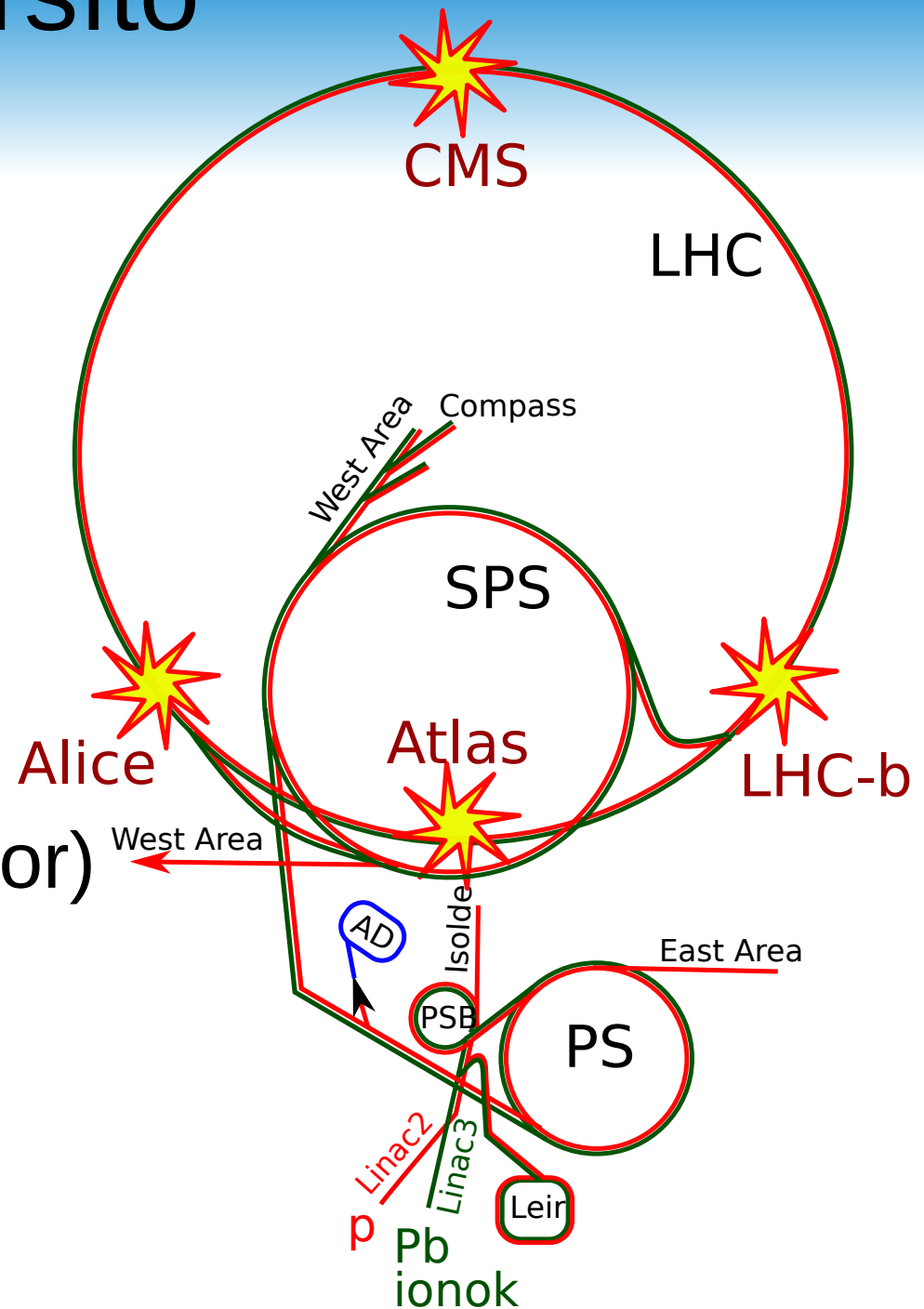
# Miben más még mint a “hagyományos” mikroszkópok?

- Sokkal nagyobb
- “Hagyományos” mikroszkópban “valami más objektumot” vizsgálunk egy adott sugárzással
- A nagyenergiás gyorsítóknál használt “hullám” v. “sugárzás” által vizsgált “minta” már gyakran saját maga... :
- ha két nyalábot egymásnak ütköztetünk.

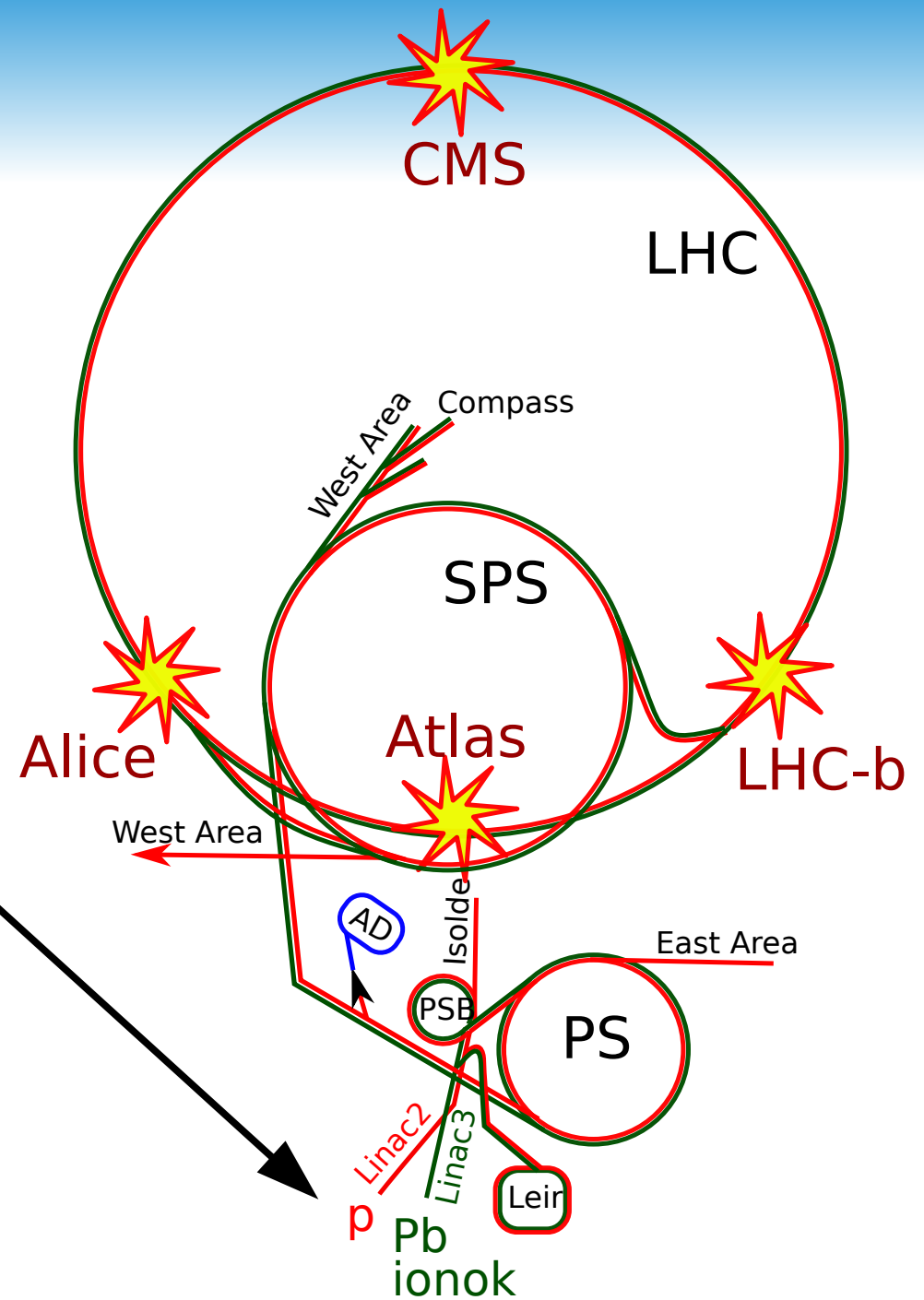
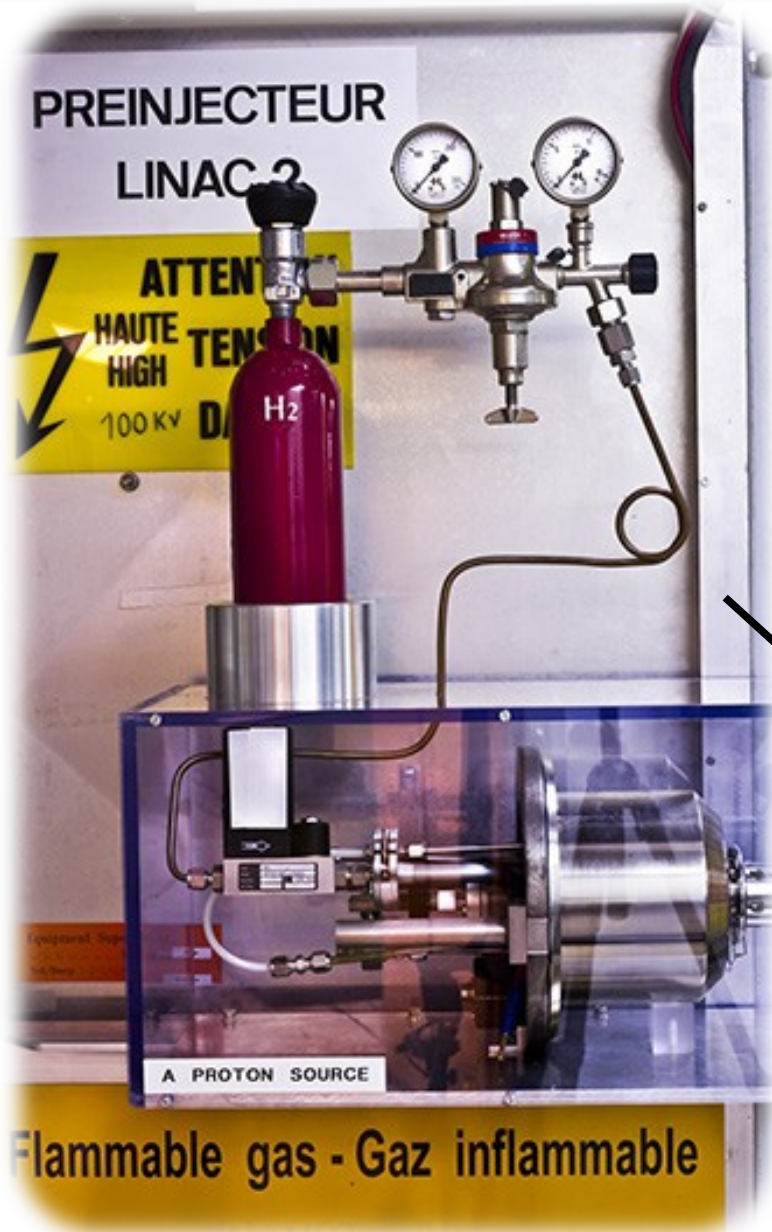
# Klasszikus nagyenergiás gyorsítórendszerek és alkotóelemeik

# Nagyenergiás gyorsító komplexumok

- Több fokozatból állnak:
- Forrás
- Lineáris szakasz (linac = **linear accelerator**)
- Gyűrű szakaszok



# A részecskeforrás



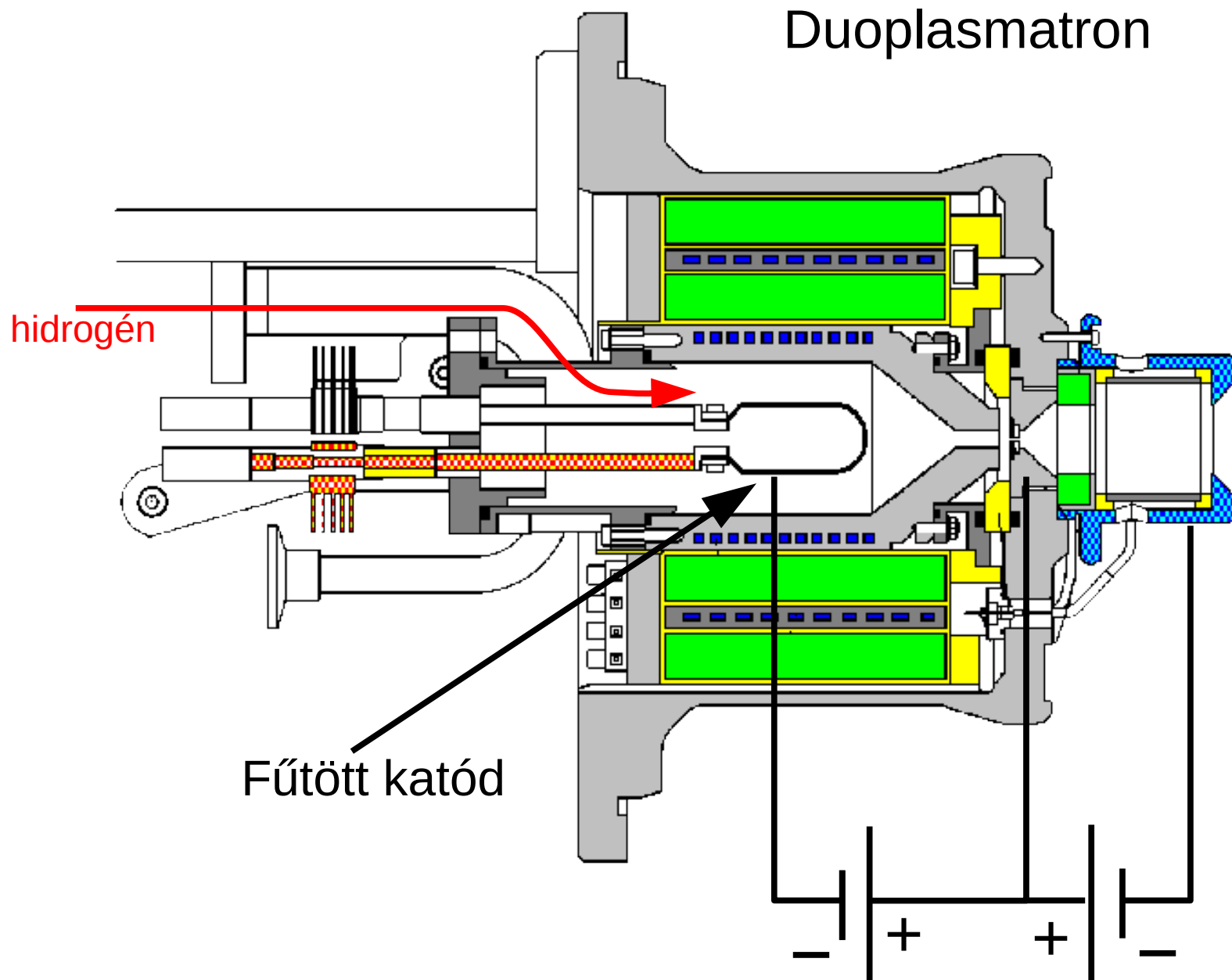
# Mennyi hidrogént fogyasztunk?

## CERN-LHC:

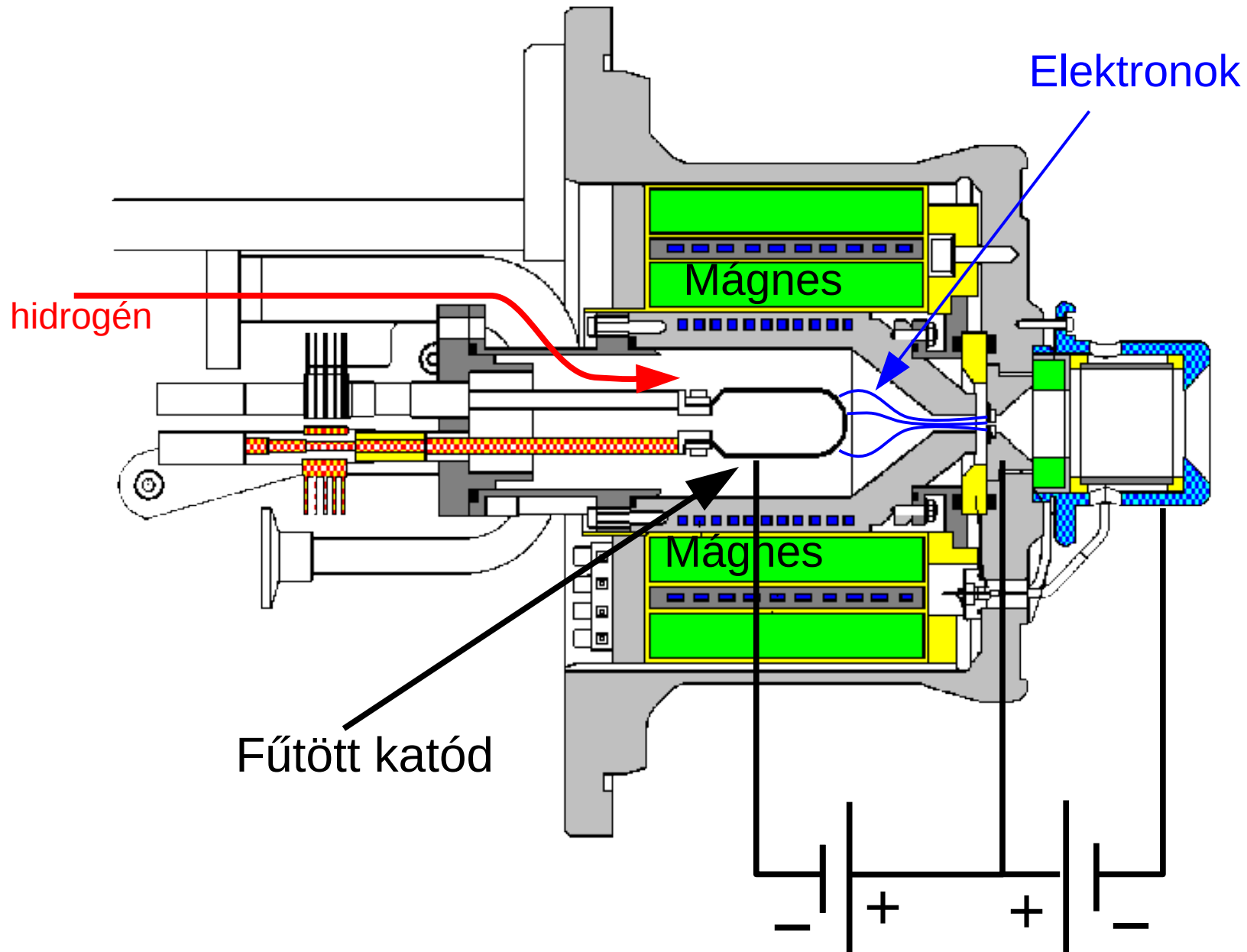
- $\sim 10^{11}$  proton egy csomagban
- 2808 csomag kering egy irányban
- $\sim 5 \times 10^{14}$  proton van egyszerre a gyűrűben
- 10 óránként töltik újra a gyűrűt
- **$10^6$  év alatt használ el (az LHC) 1 g hidrogént**
- A teljes CERN gyorsítókomplexum (más gyorsítók és kísérletek) összesen kb 50x ennyi hidrogént fogyasztanak.

**Paul Scherrer Institute (PSI)** – Svájc  
Ciklotron gyorsító, a világ legintenzívebb,  
folyamatos proton nyalábja: 2.2 mA  
**500 nap alatt 1 g hidrogént**

# H<sub>2</sub>-ből protonok?

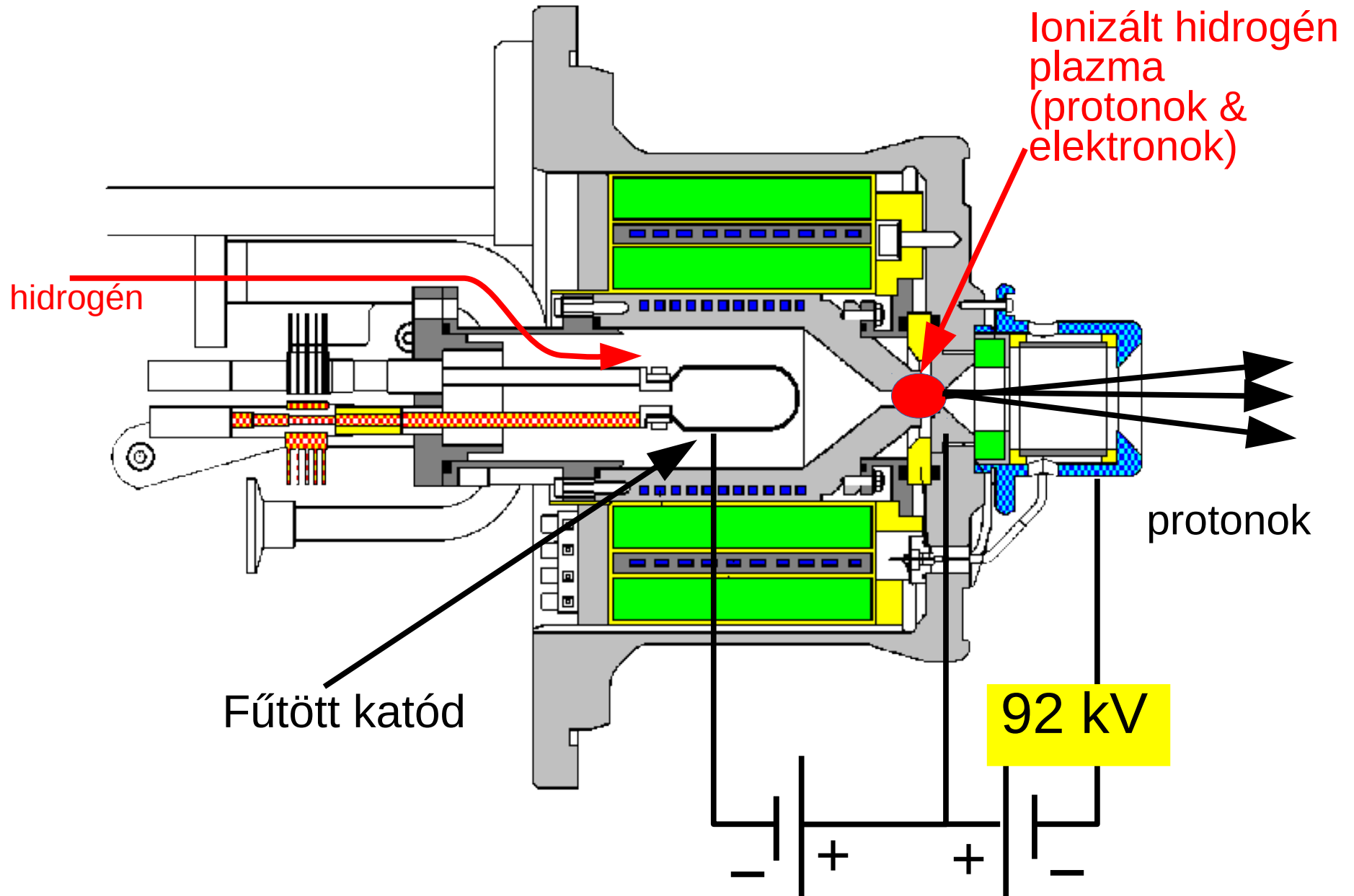


# H<sub>2</sub>-ből protonok?





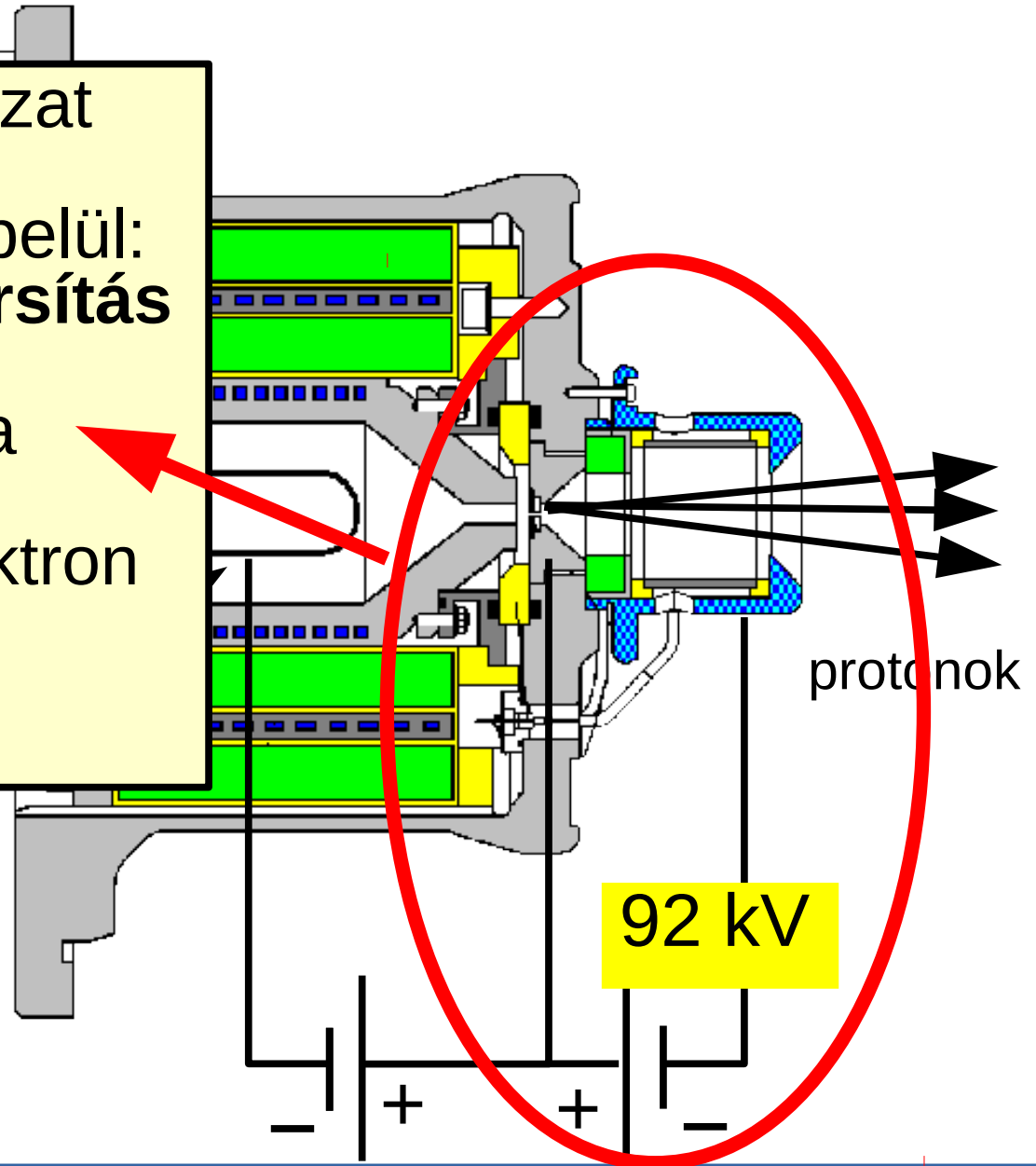
# H<sub>2</sub>-ből protonok?



# H<sub>2</sub>-ből protonok?

- A legelső gyorsítófokozat tipikusan már a részecskeforrásokon belül: **elektrosztatikus gyorsítás**
- Ugyanaz az elv, mint a korábbi példákban (TV, Röntgen cső, elektron mikroszkóp)

Fűtött katód



# (kitérő: elektrosztatikus gyorsítás)



- KFKI Wigner Fizikai Kutatóközpont **Van de Graaff** gyorsítója
- Elektrosztatikus gyorsító
- Mekkora energia... azaz hány volt???

# (kitérő: elektrosztatikus gyorsítás)

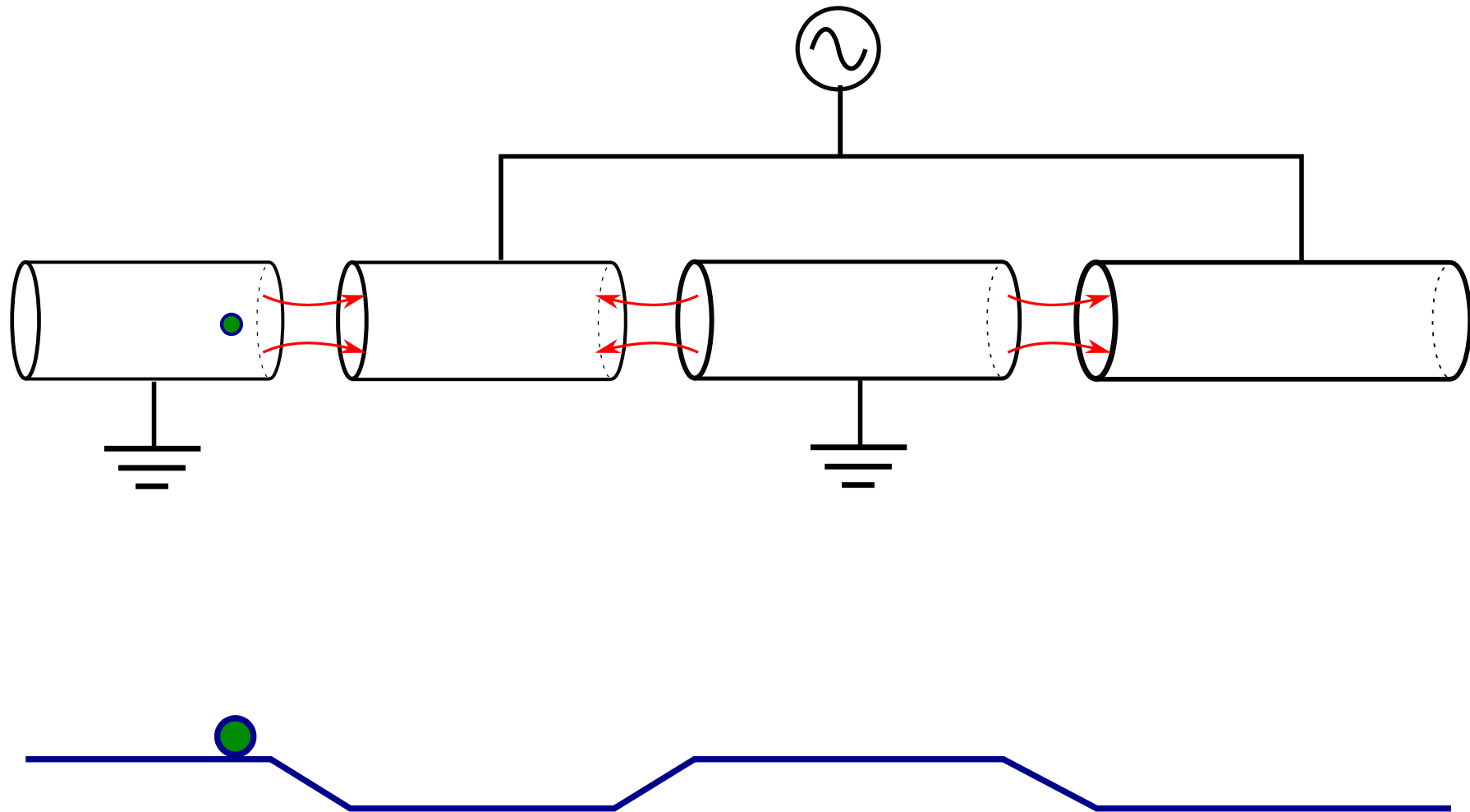


- KFKI Wigner Fizikai Kutatóközpont **Van de Graaff** gyorsítója
- Elektrosztatikus gyorsító
- Mekkora energia... azaz hány volt???
- **5 MeV → 5 millió volt!**
- Nagy méretek
- Elektromos átütés veszélye
- Nem nagyon lehet ezt az energiát meghaladni
- (A fizika szertár nagyon hatásos eszköze egy Van de Graaff generátor!!!)

# Magasabb energia – hogyan?

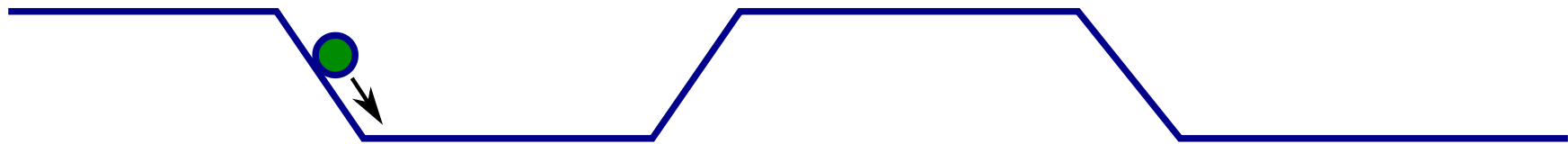
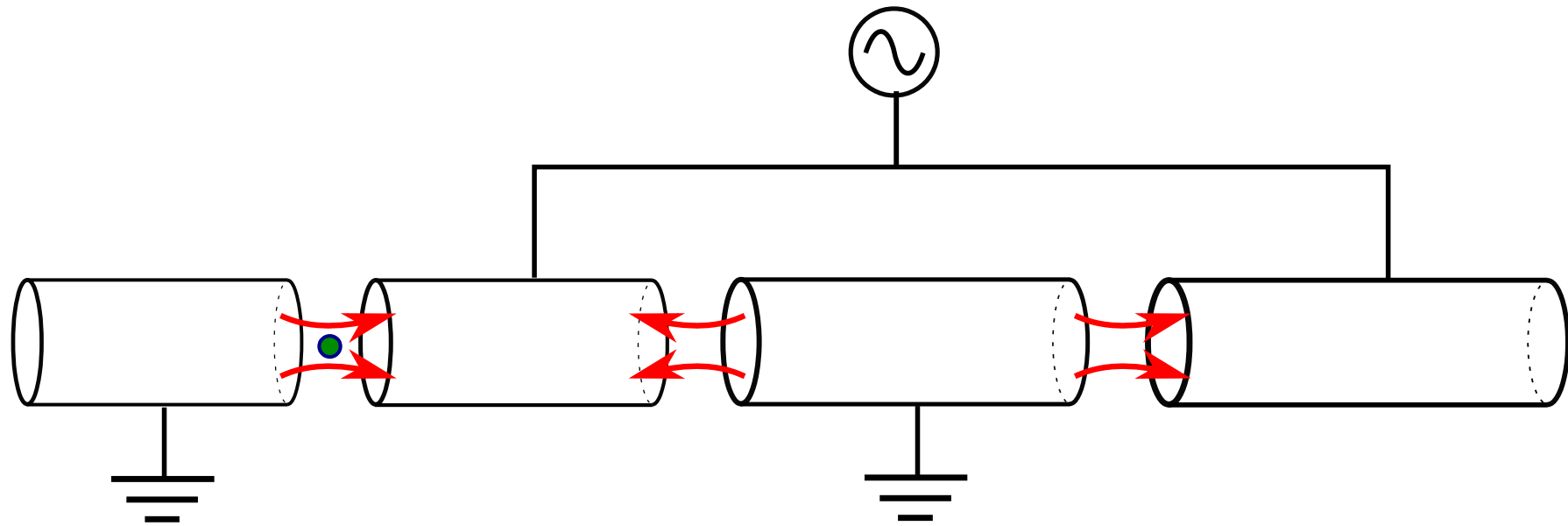
- Nem lehetne valahogyan többször felhasználni ugyanazt a teret? Minden áthaladásnál gyorsítana...
- NEM – az elektrosztatikus tér **konzervatív**, a részecske mozgási energiája kizárólag a helyének a függvénye, függetlenül attól, hogy milyen úton jutott oda.
- Ha az elektrosztatikus térrel ez nem működik, talán időben változó tér.... ?
- **IGEN!**

# Wideroe linac



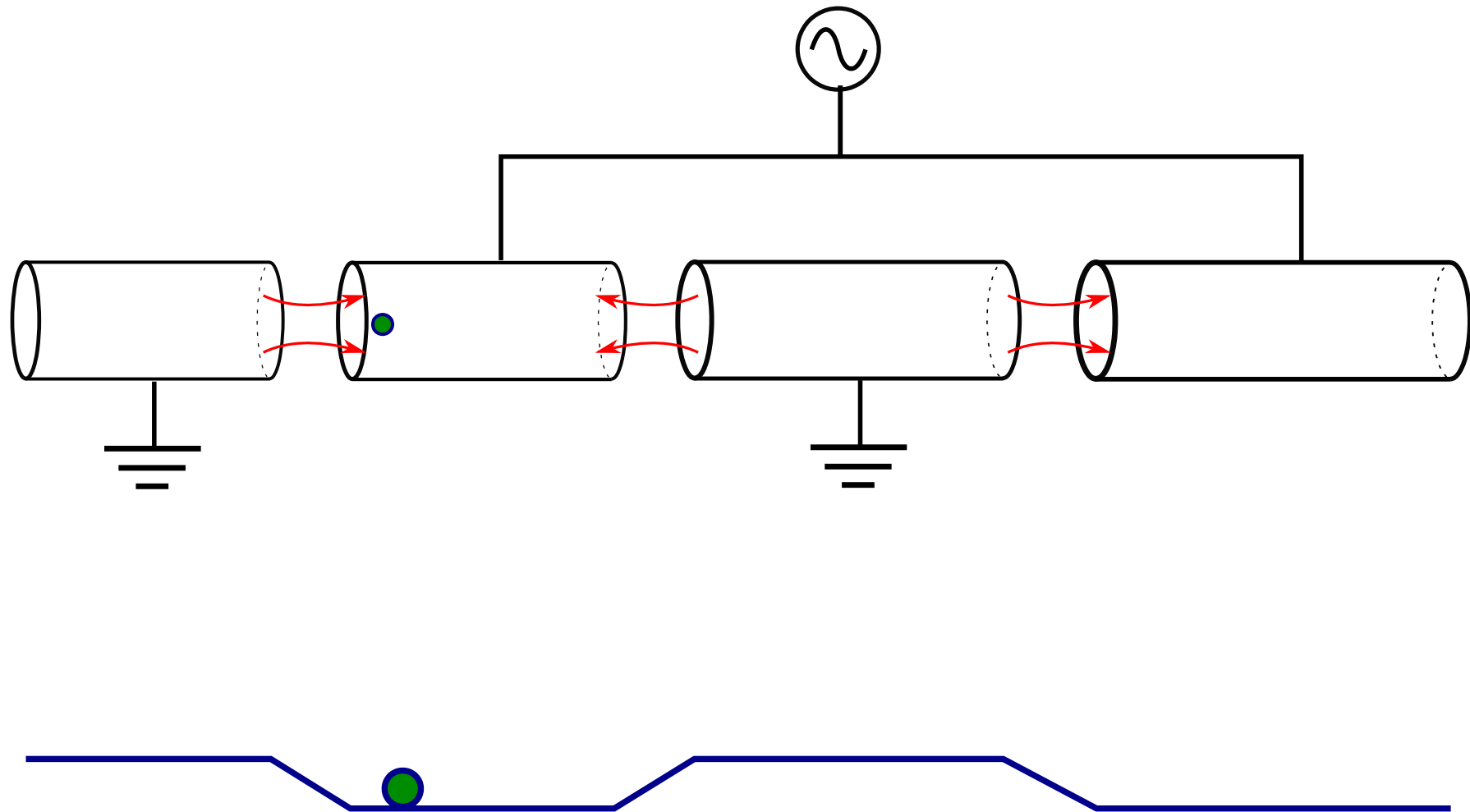
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

# Wideroe linac



<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

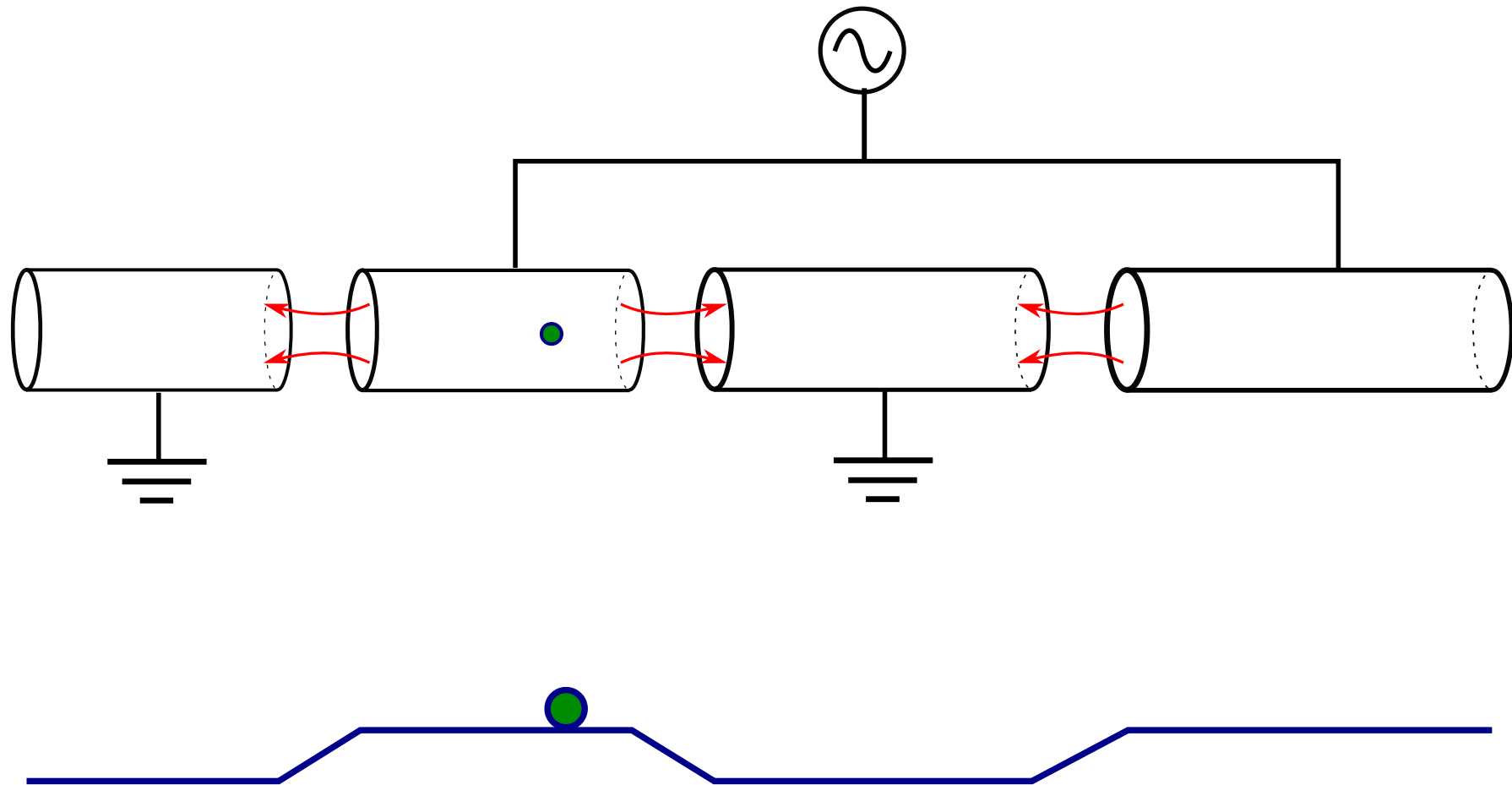
# Wideroe linac



<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

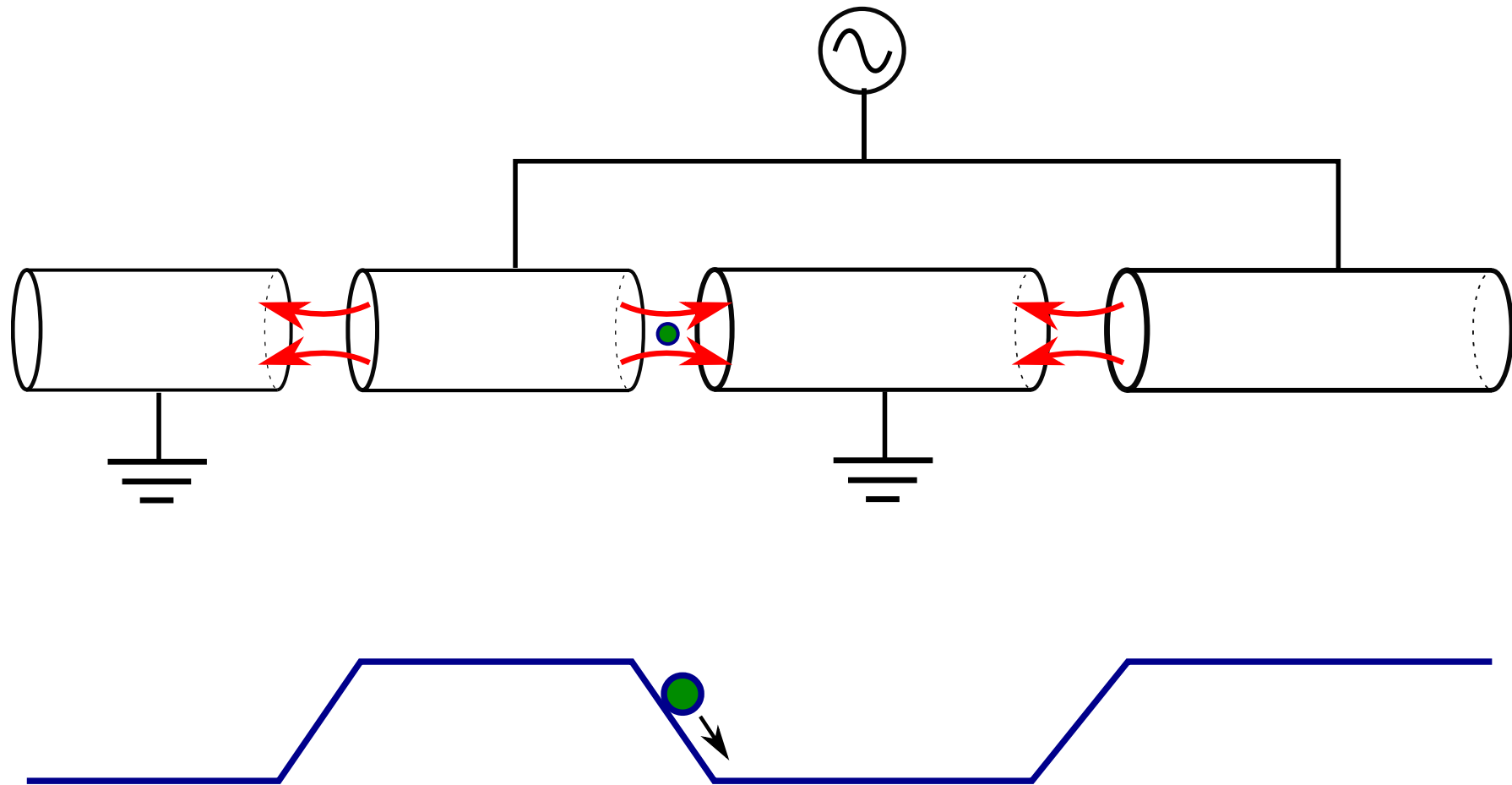


# Wideroe linac



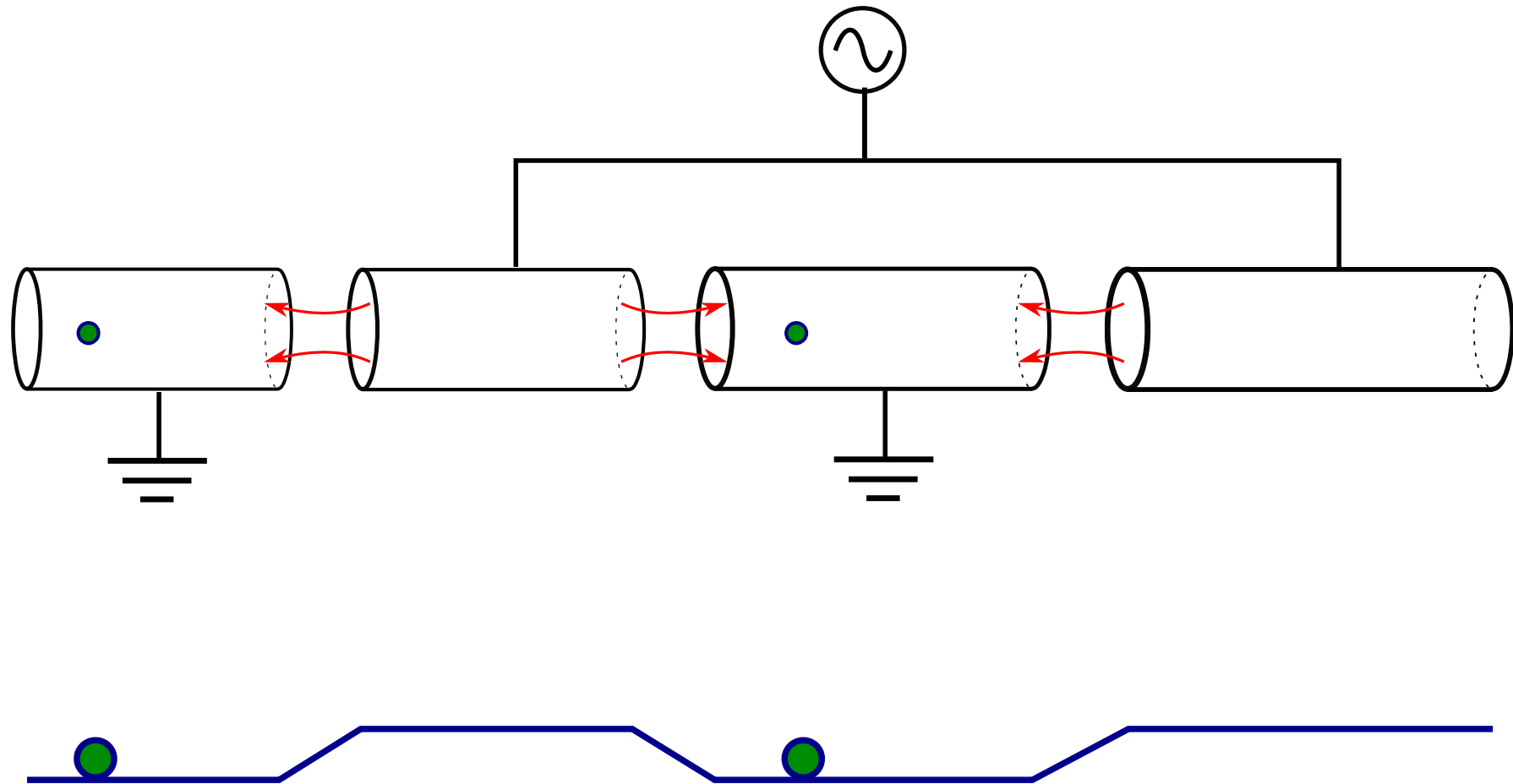
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

# Wideroe linac



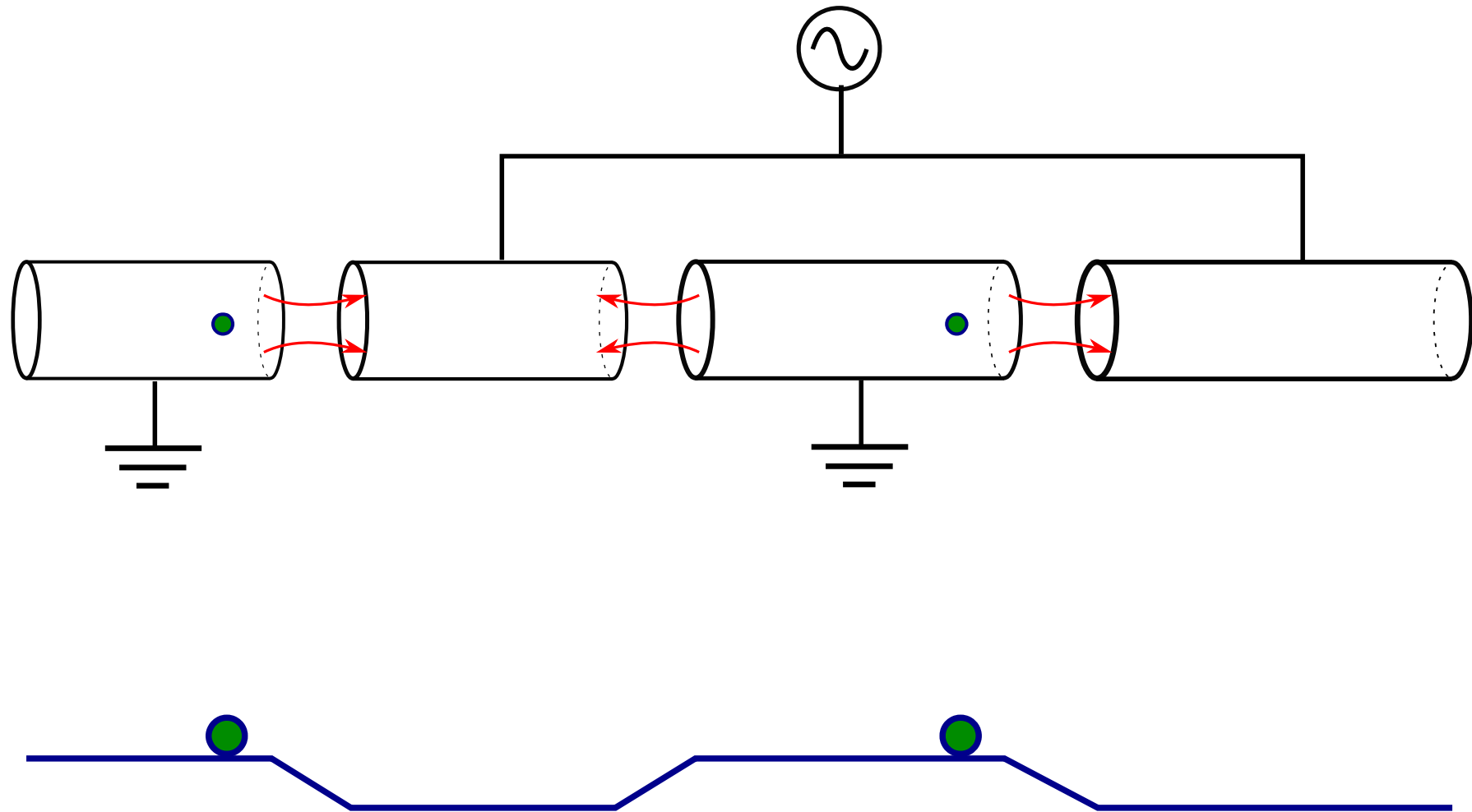
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

# Wideroe linac



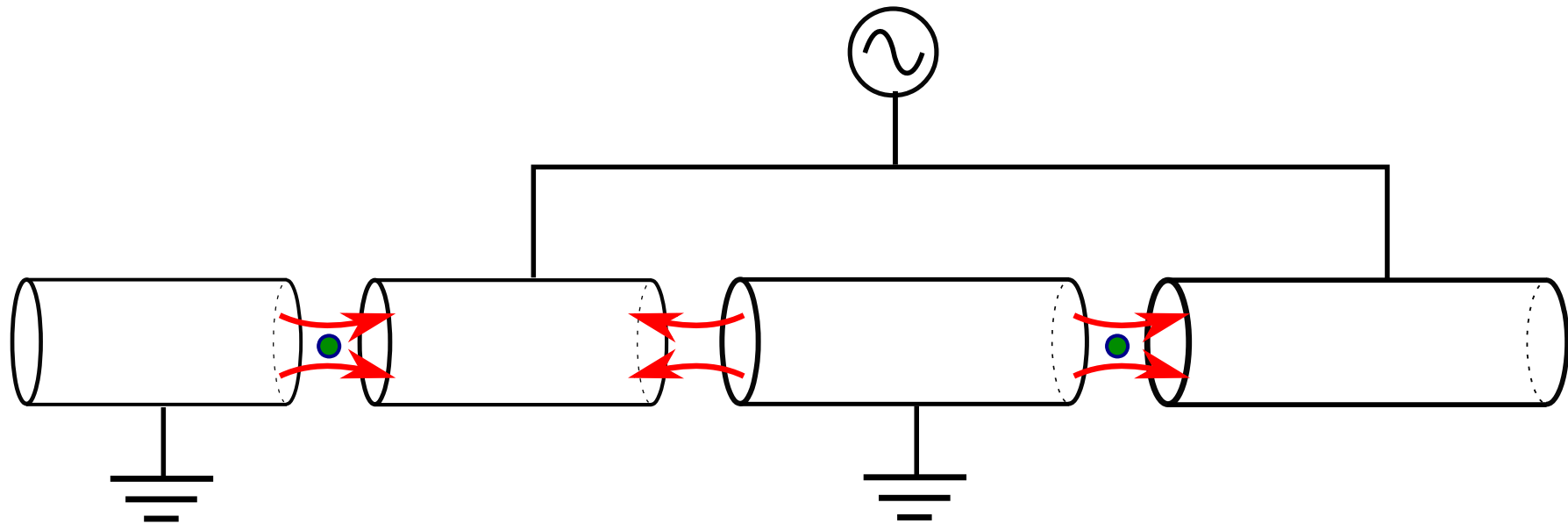
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

# Wideroe linac

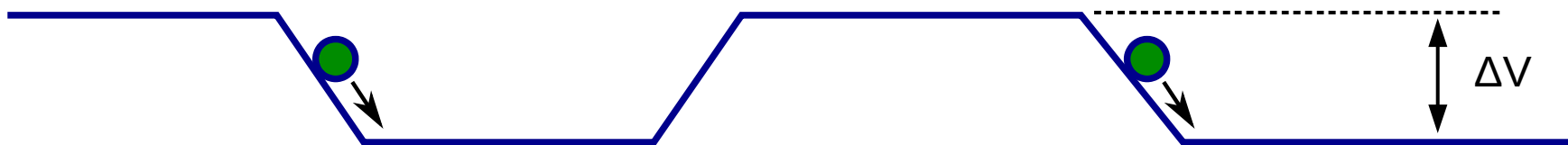


<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

# Wideroe linac



- Csak a megfelelő fázisban érkező részecskék gyorsulnak
- A részecskék tehát **szinkronizált csomagokban** jönnek!



- A komponensek között max.  $\Delta V$  feszültség
- De a végső energia  $n$ -szer ennyi:  $E = n \cdot q \cdot \Delta V$

A gyakorlatban  
nem használják!

# Rezonátor...



# Rezonátor...



Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mozgási** és **helyzeti**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)



# Rezonátor...



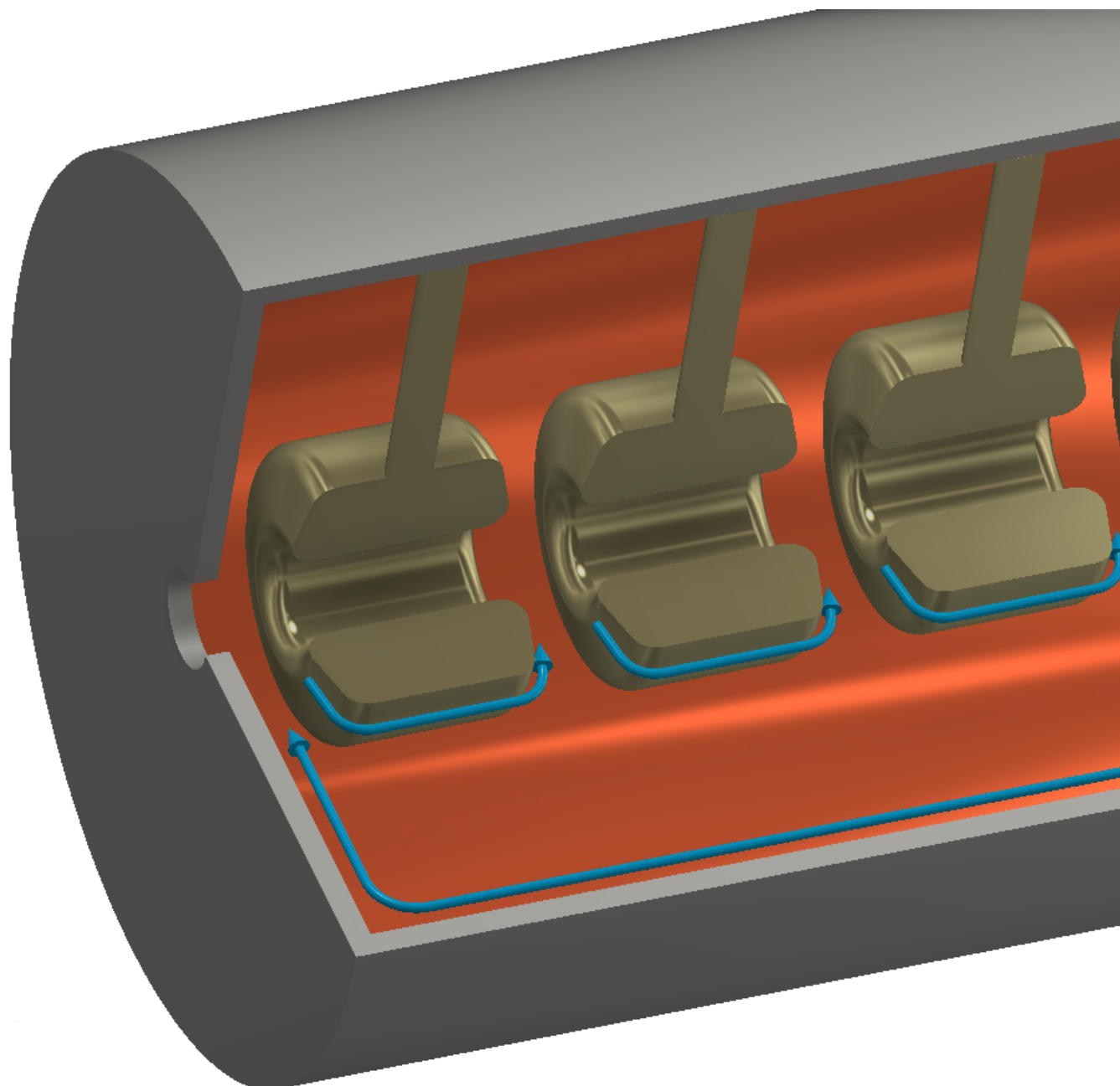
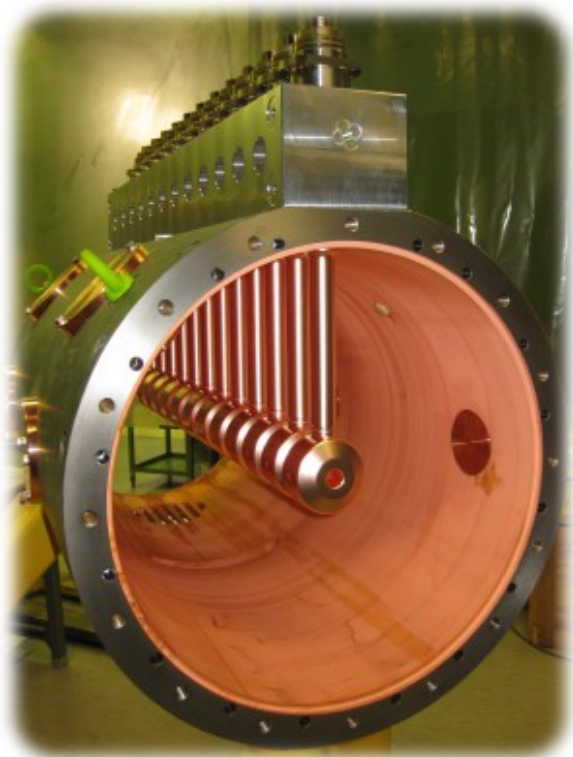
Wideroe linac:  
“az erővel  
rángatott  
megoldás”



Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mozgási** és **helyzeti**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Alvarez (vagy drift tube) linac

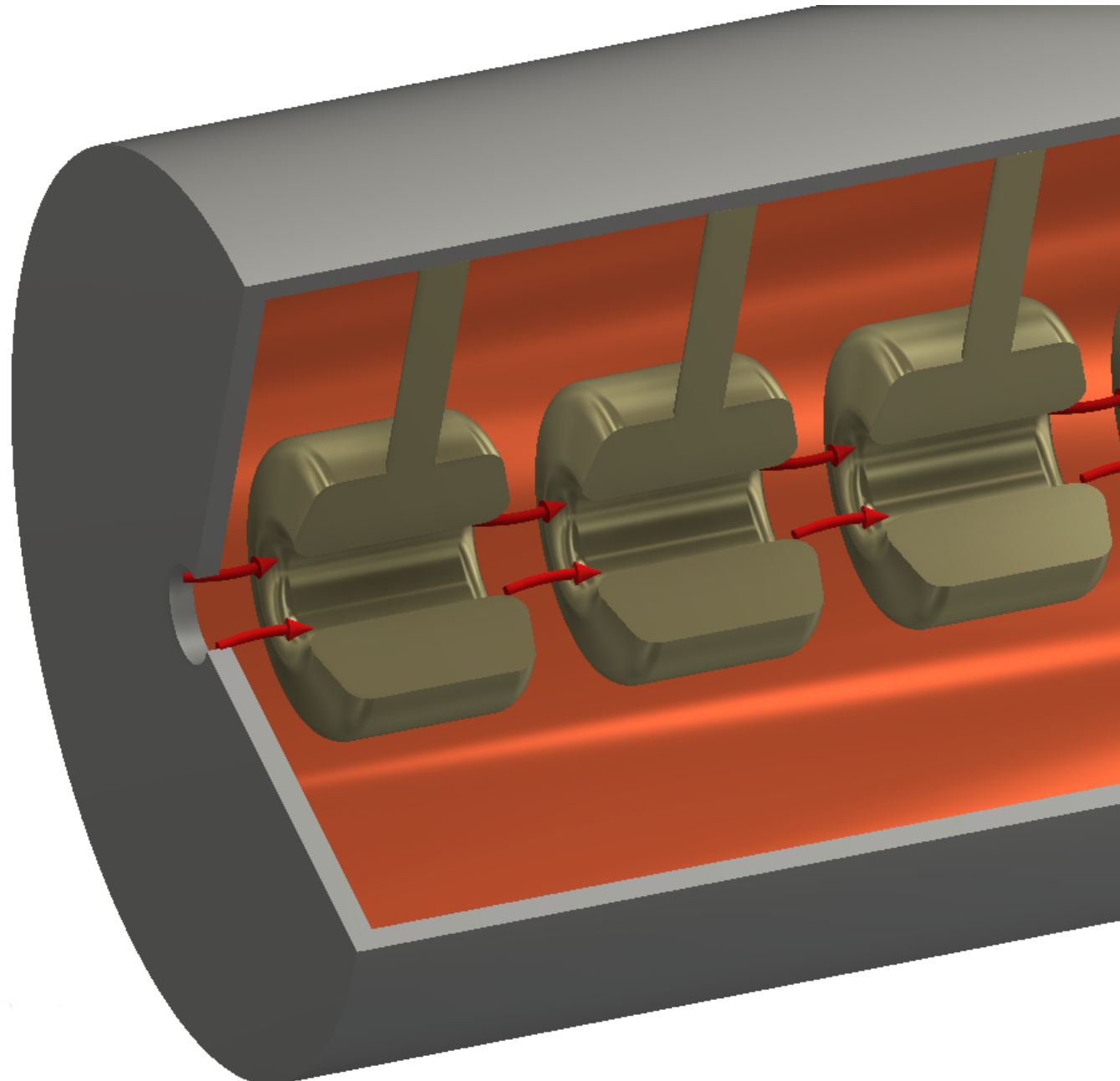
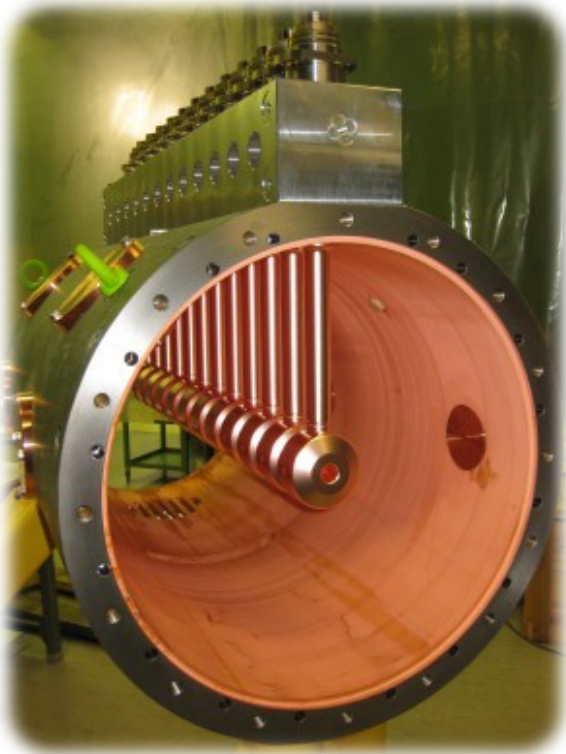


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)



# Alvarez (vagy drift tube) linac

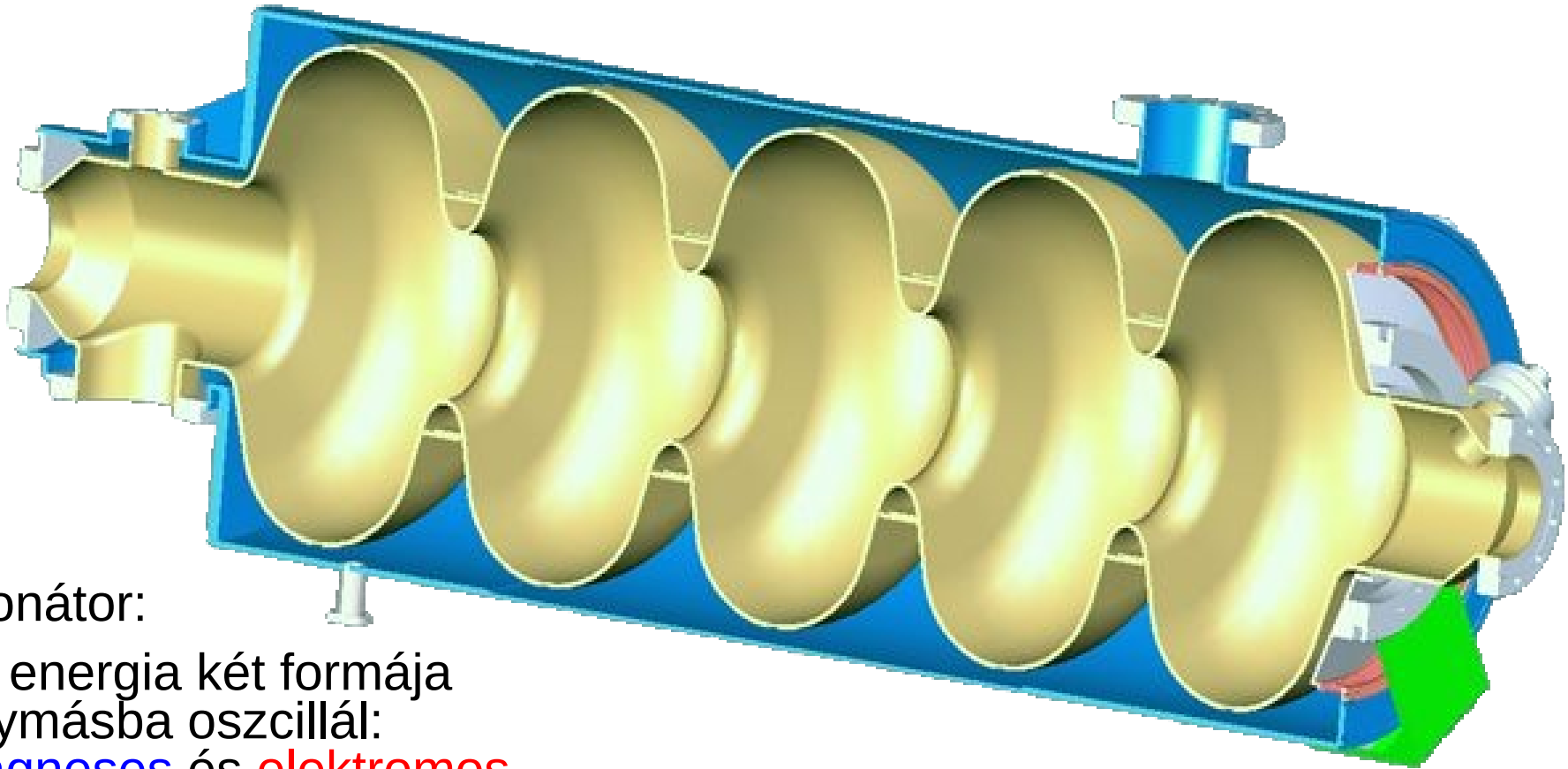


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

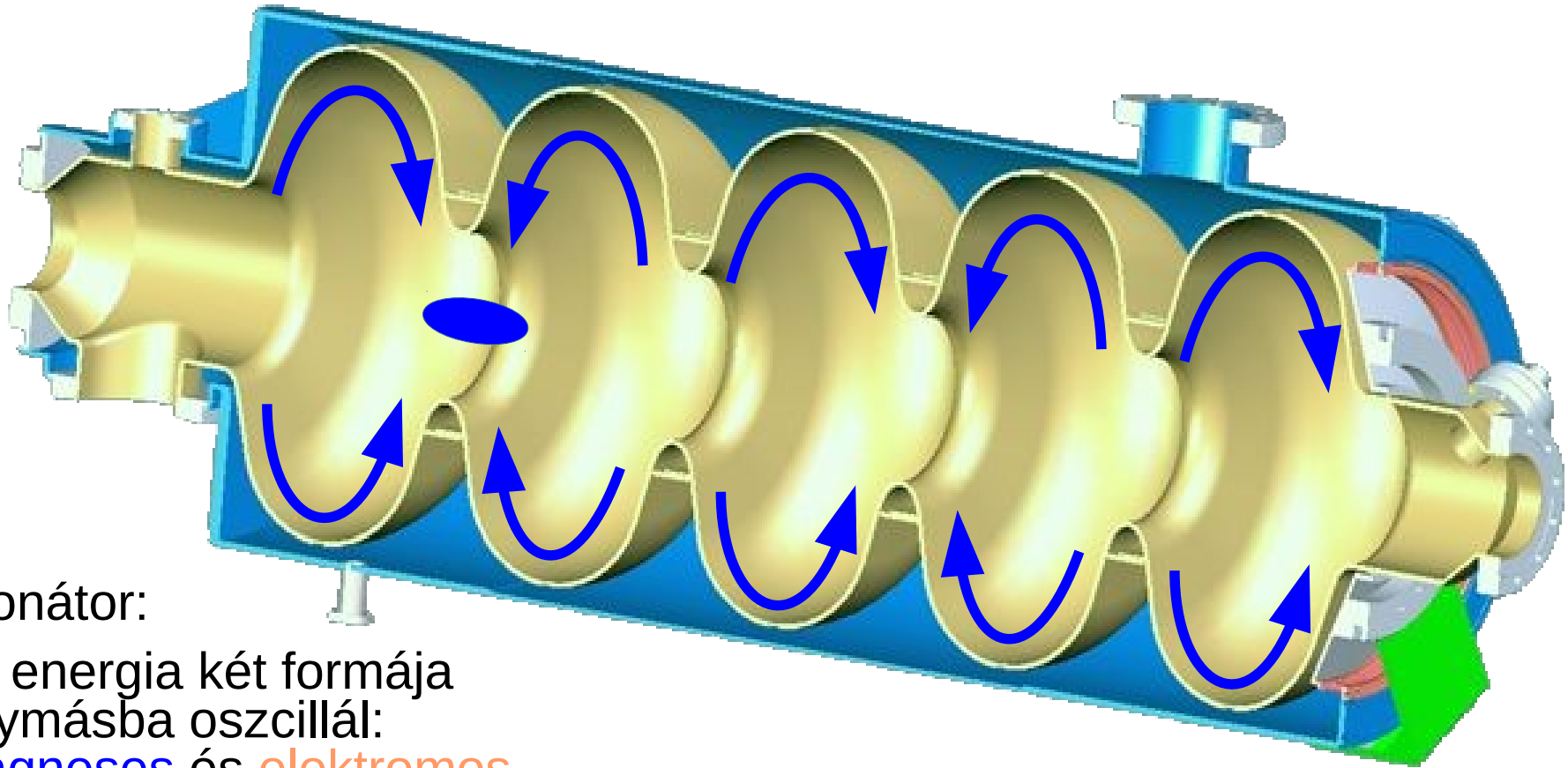


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

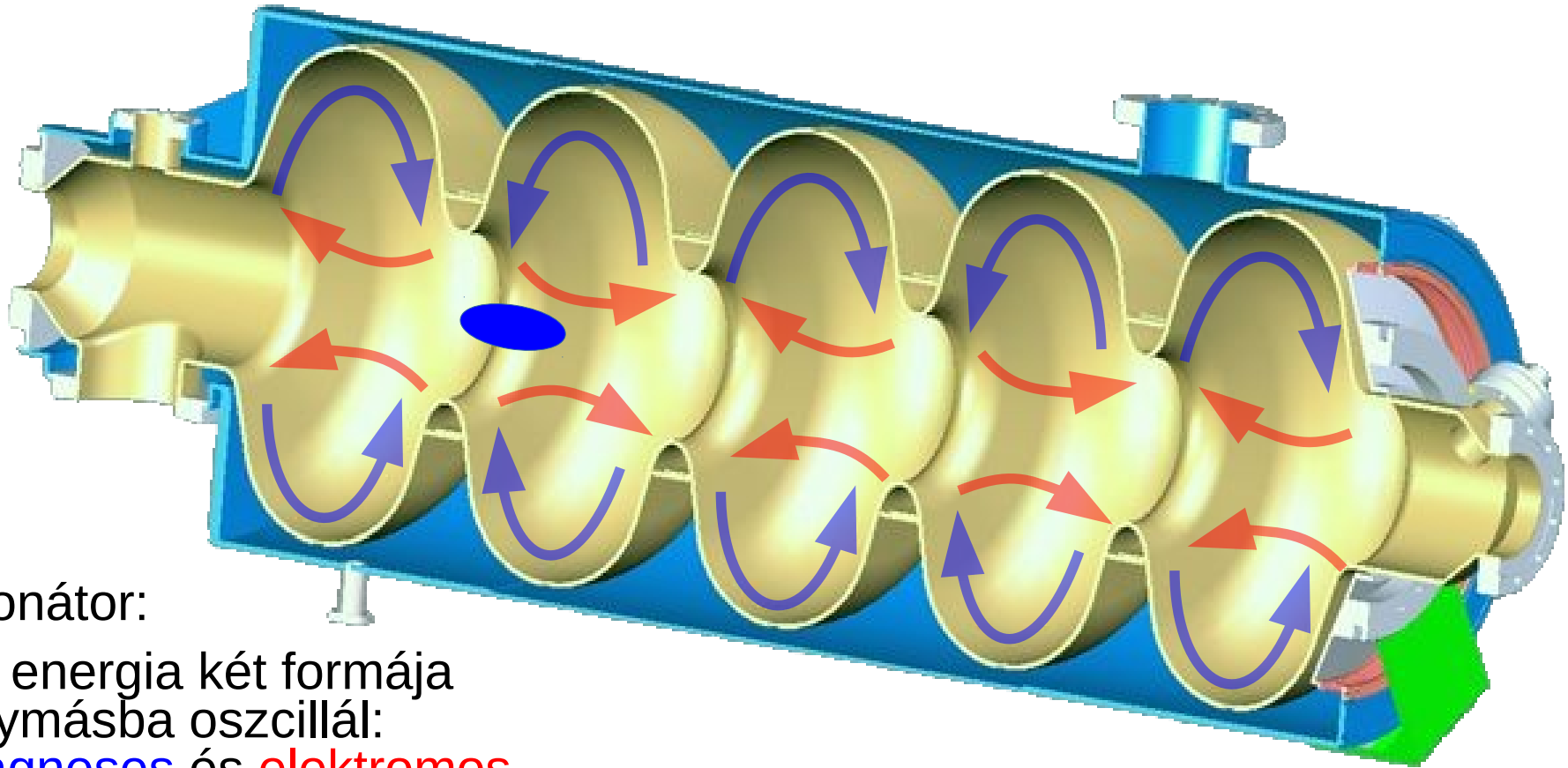


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Sokcellás gyorsító rezonátor

[http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla\\_cavity\\_illustration.webm](http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla_cavity_illustration.webm)

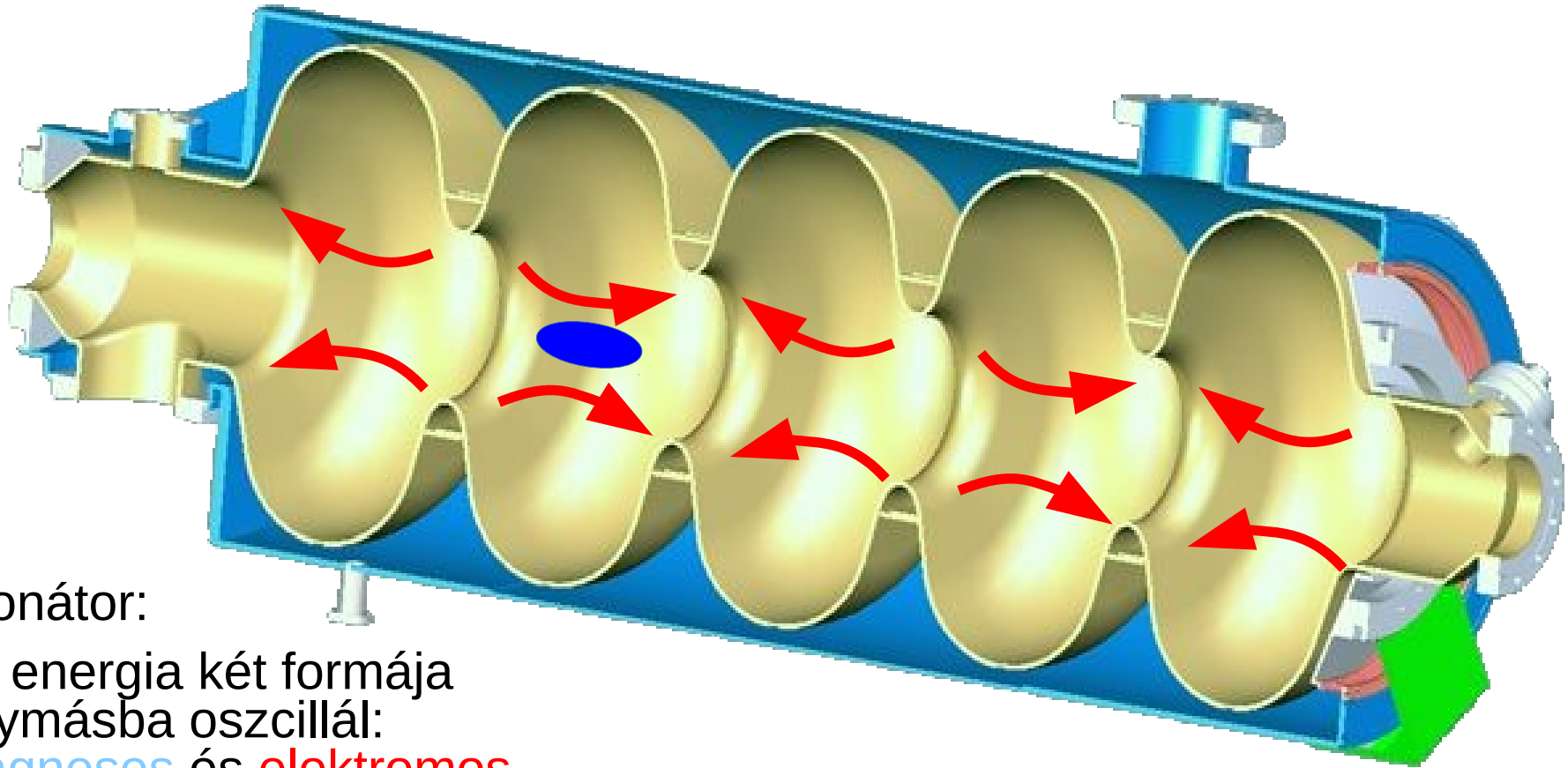


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>



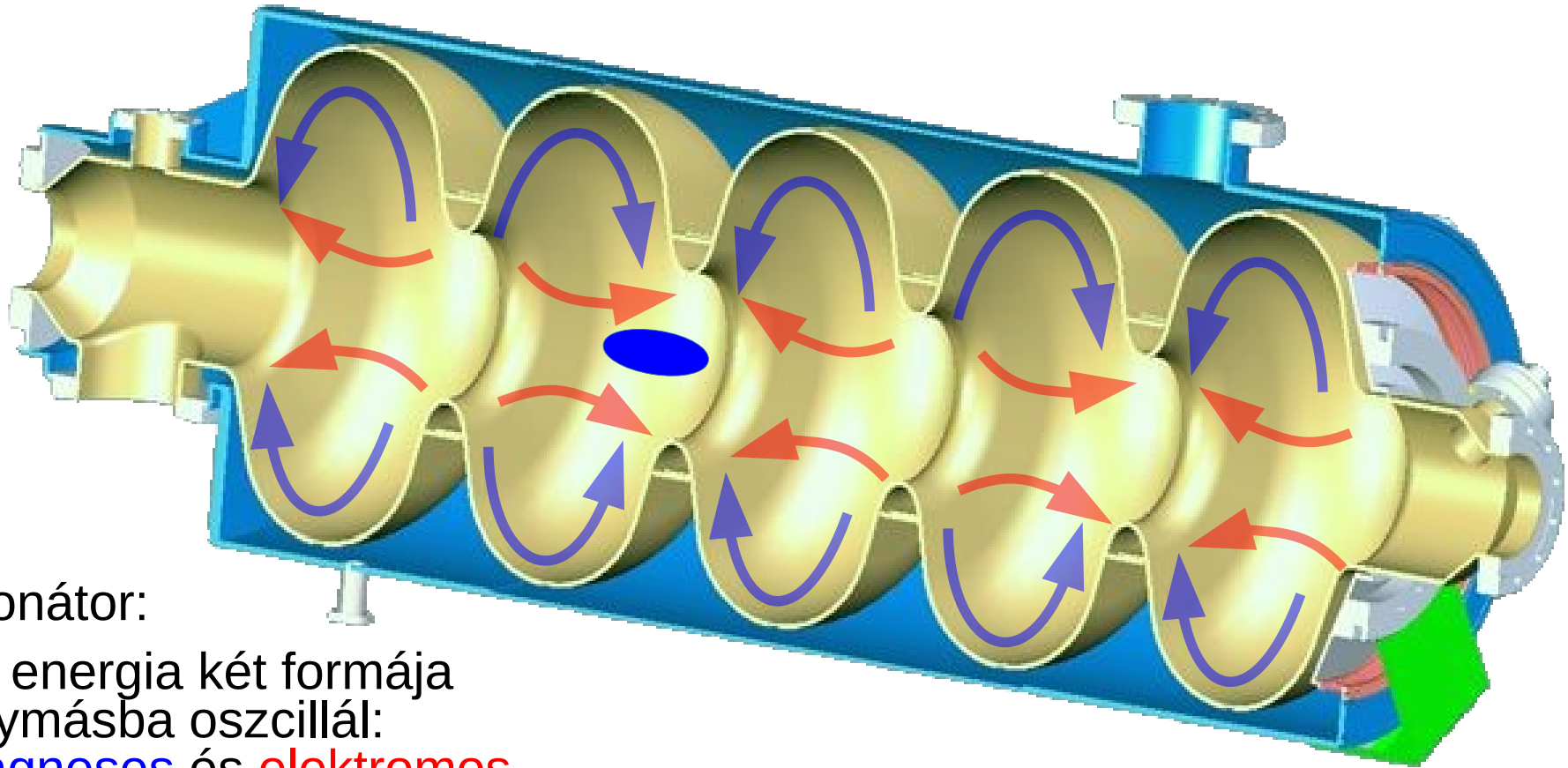
Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)



# Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

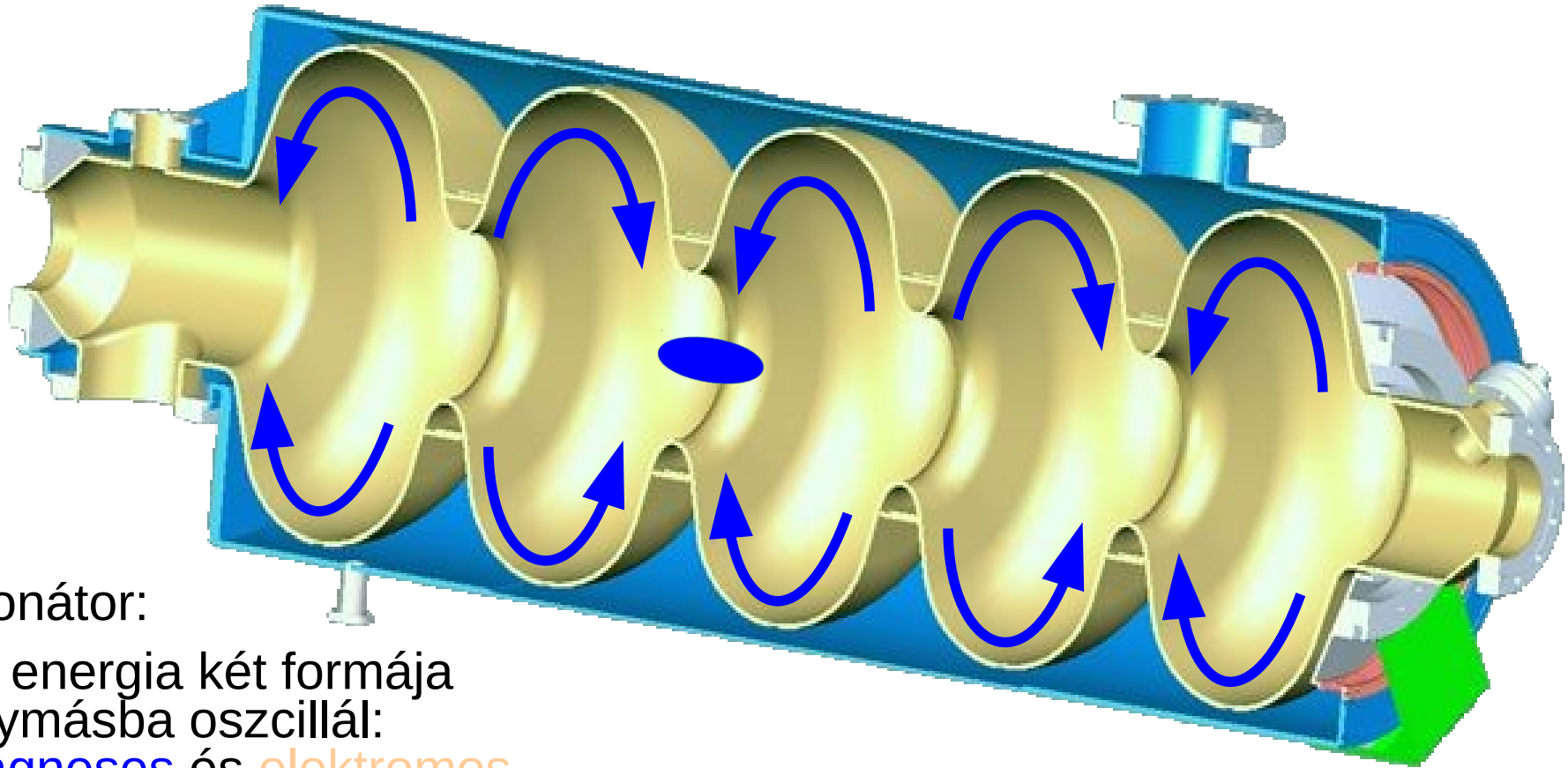


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

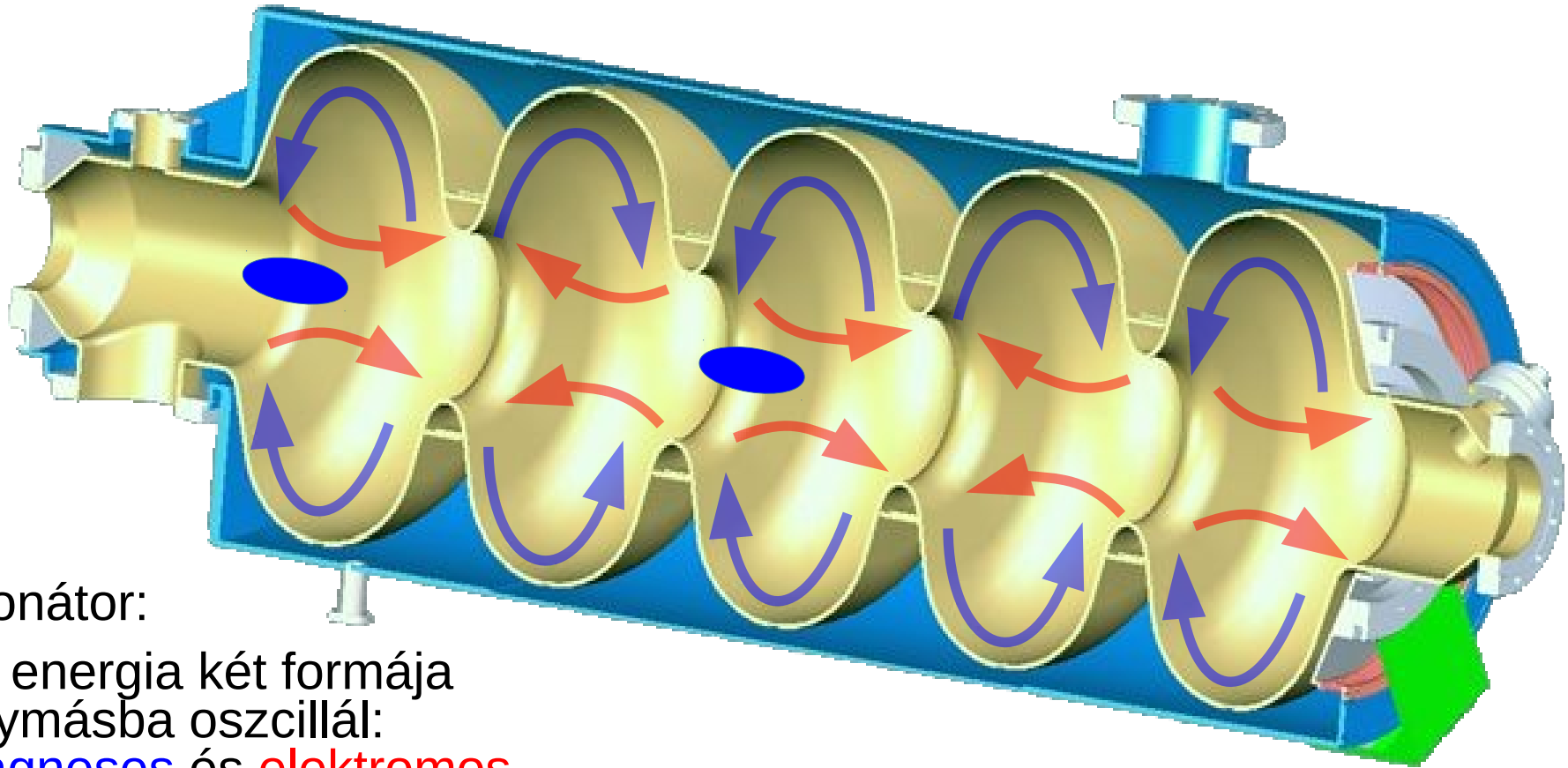


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Sokcellás gyorsító rezonátor

[http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm](http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla%20cavity%20illustration.webm)

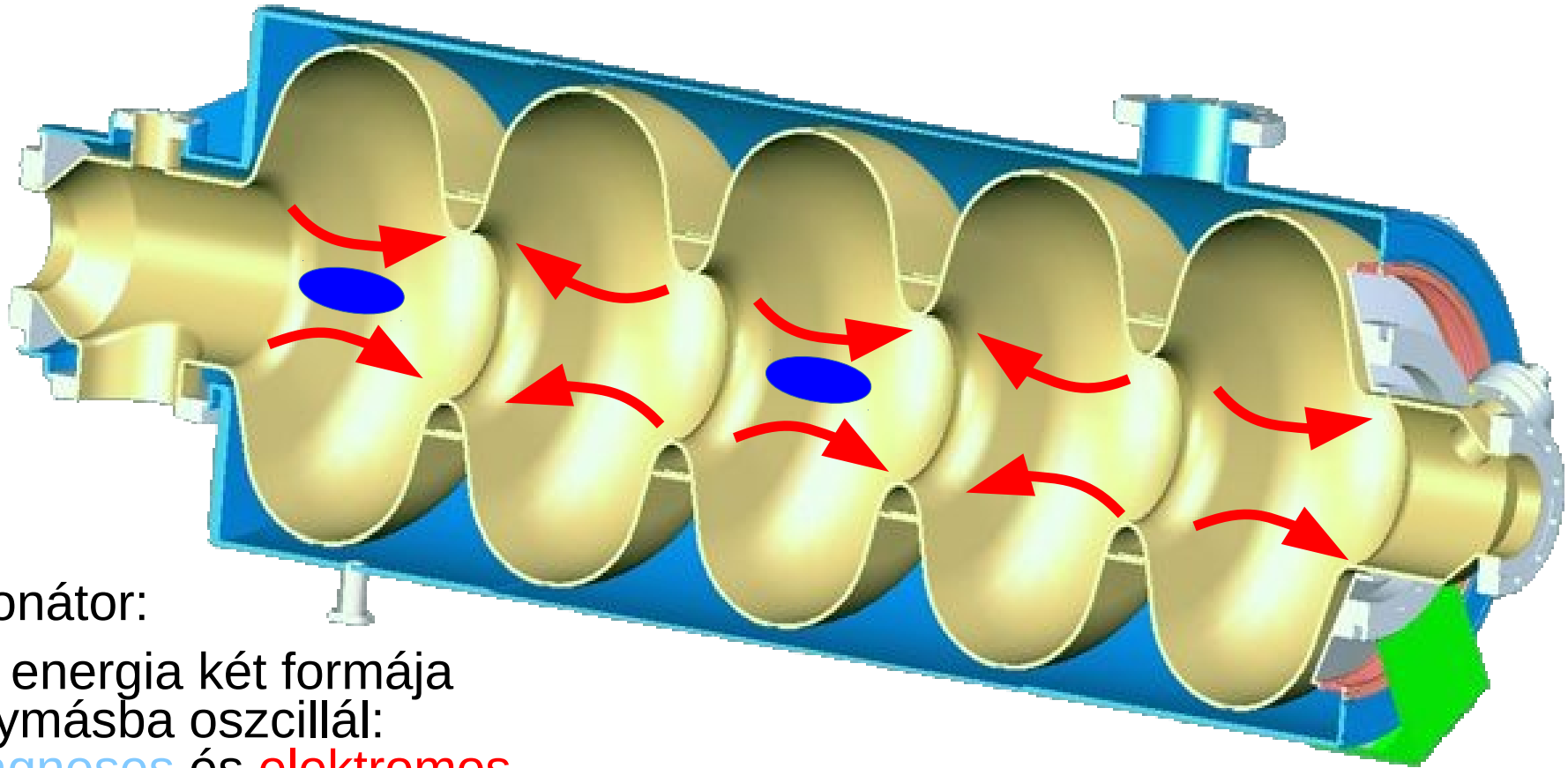


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

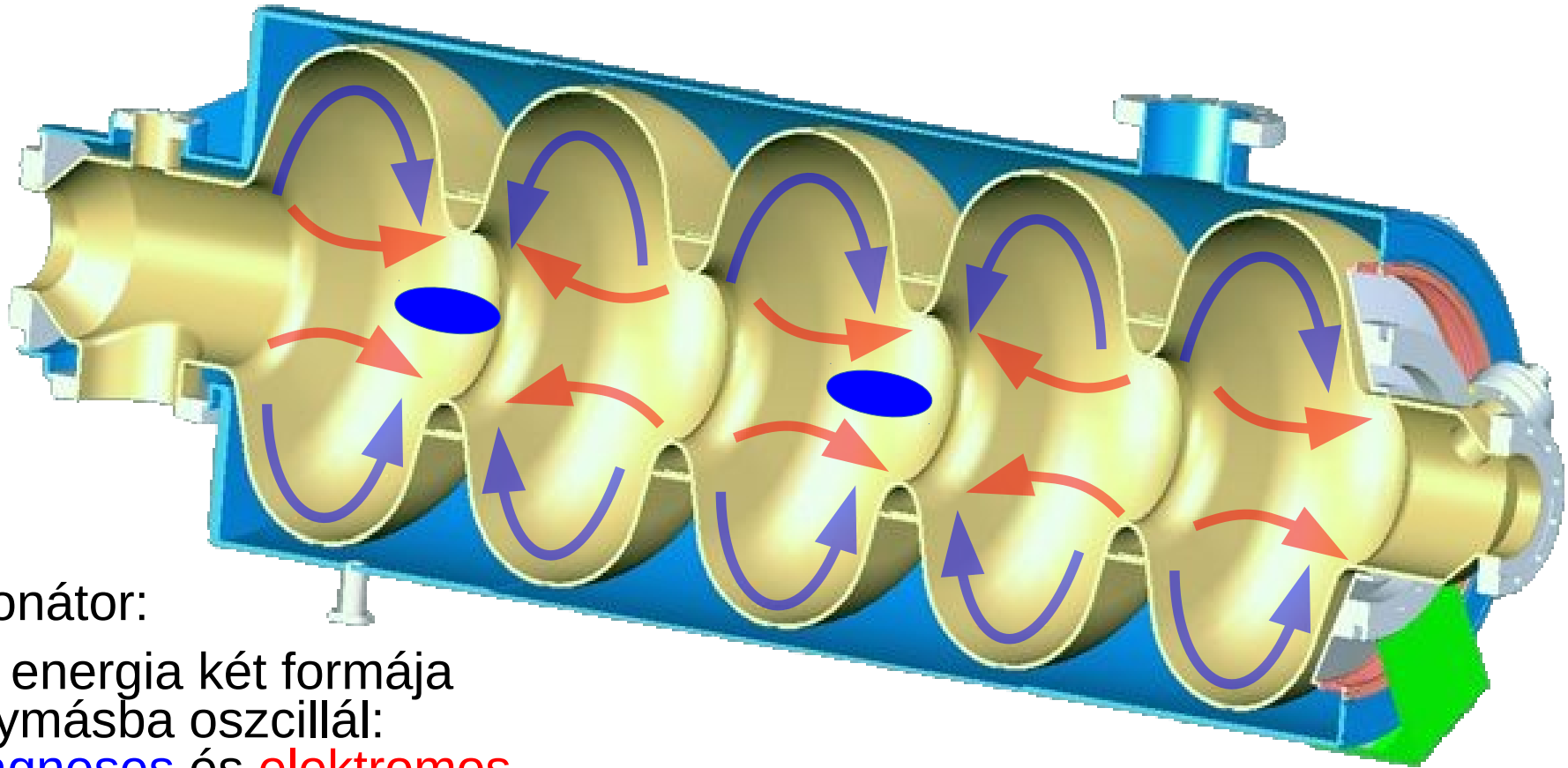


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

# Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

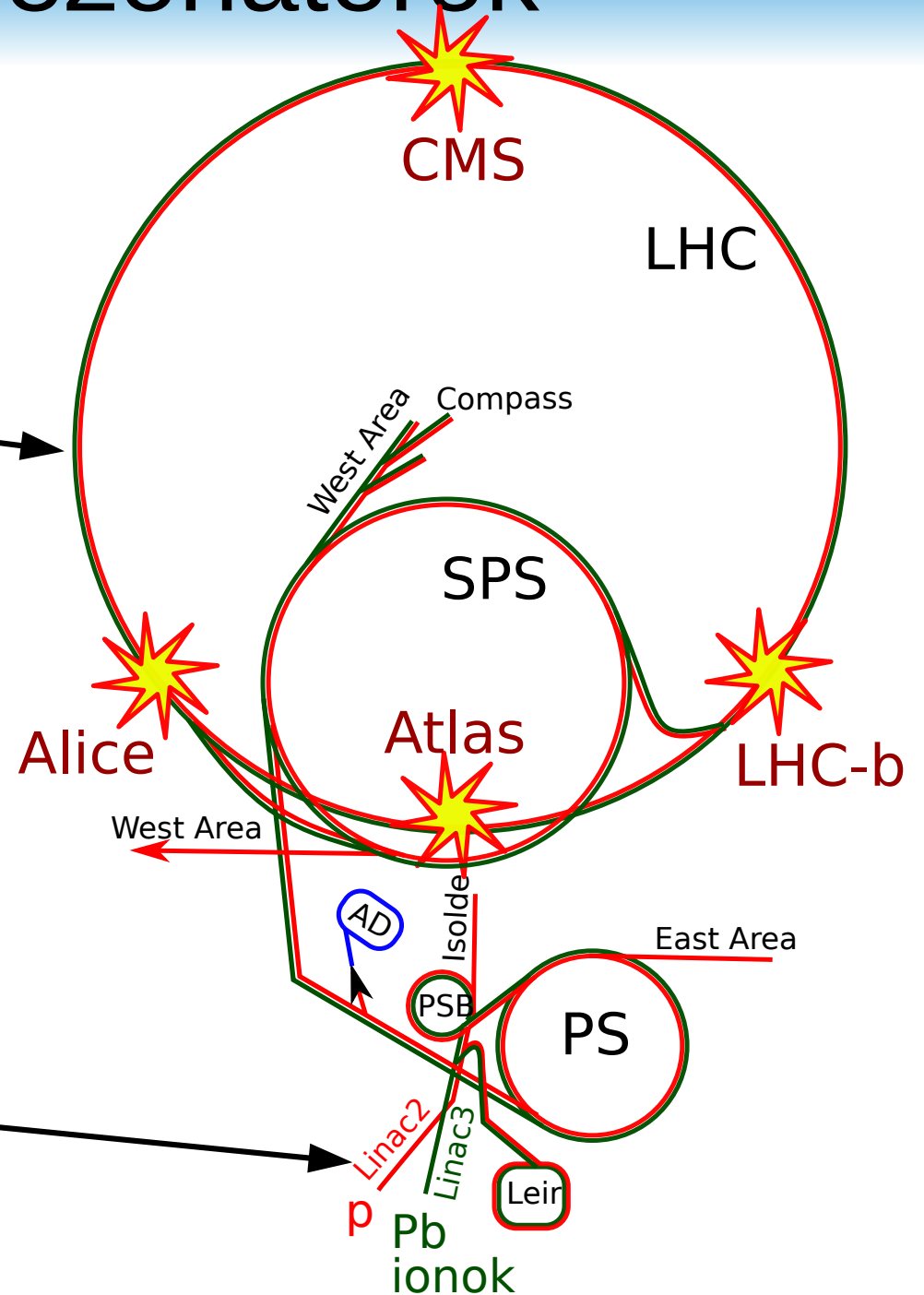
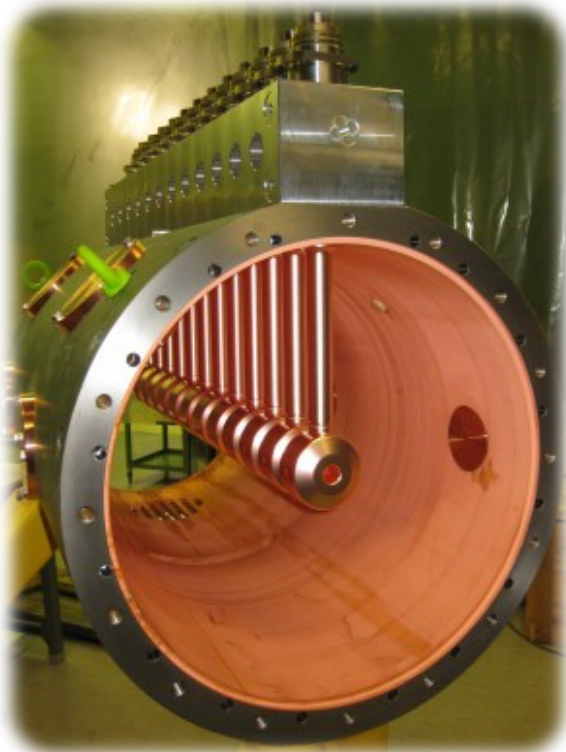
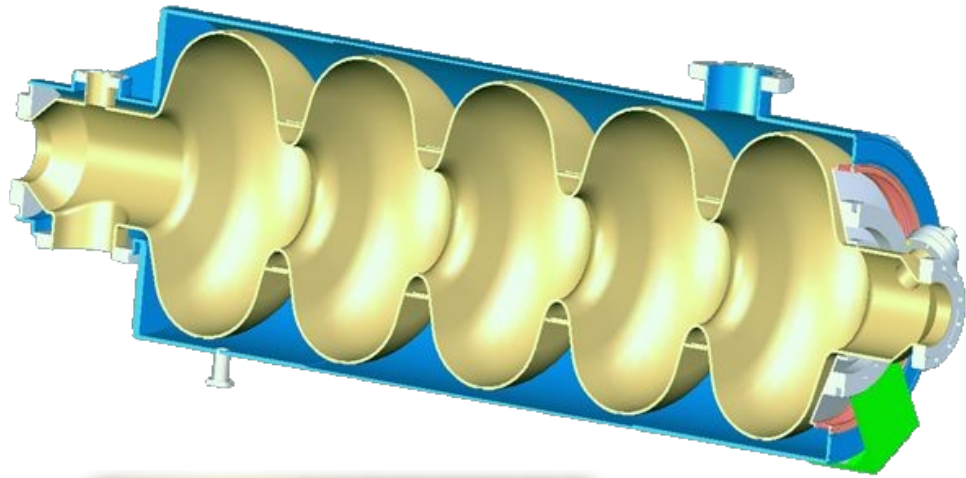


Rezonátor:

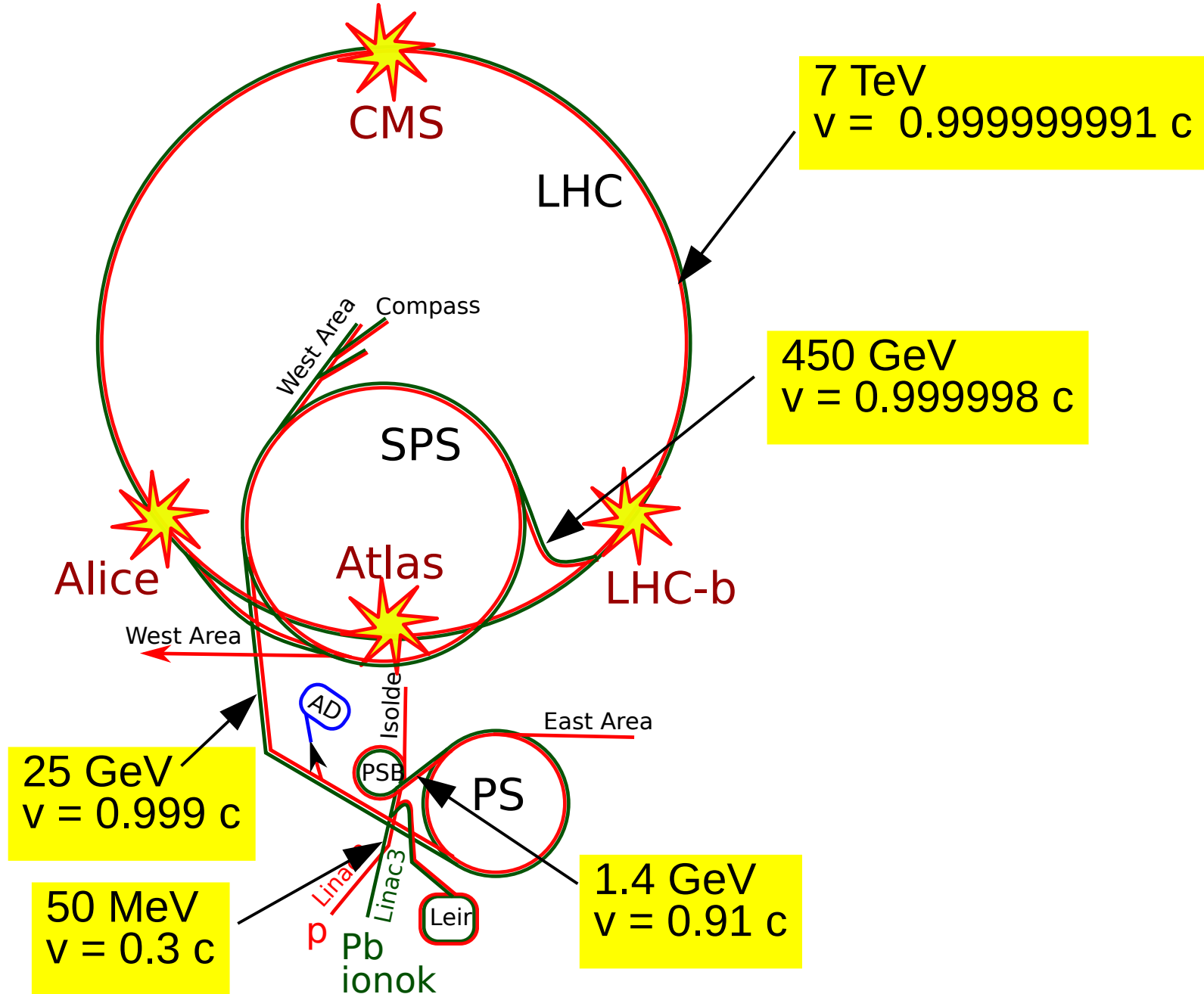
- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)



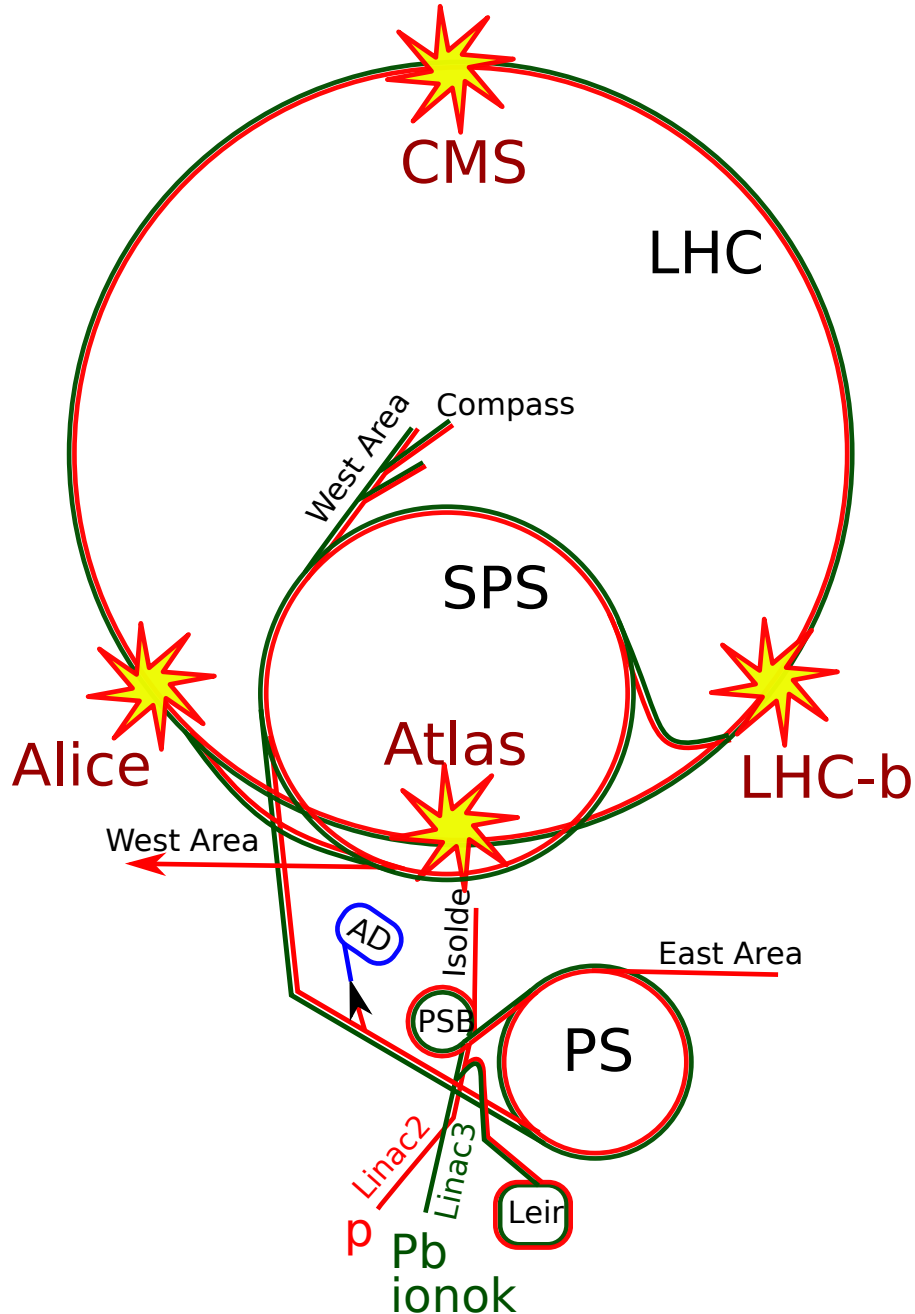
# A gyorsító rezonátorok



# A gyűrű gyorsítószakasz(ok)



# A gyűrű gyorsítószakasz(ok)



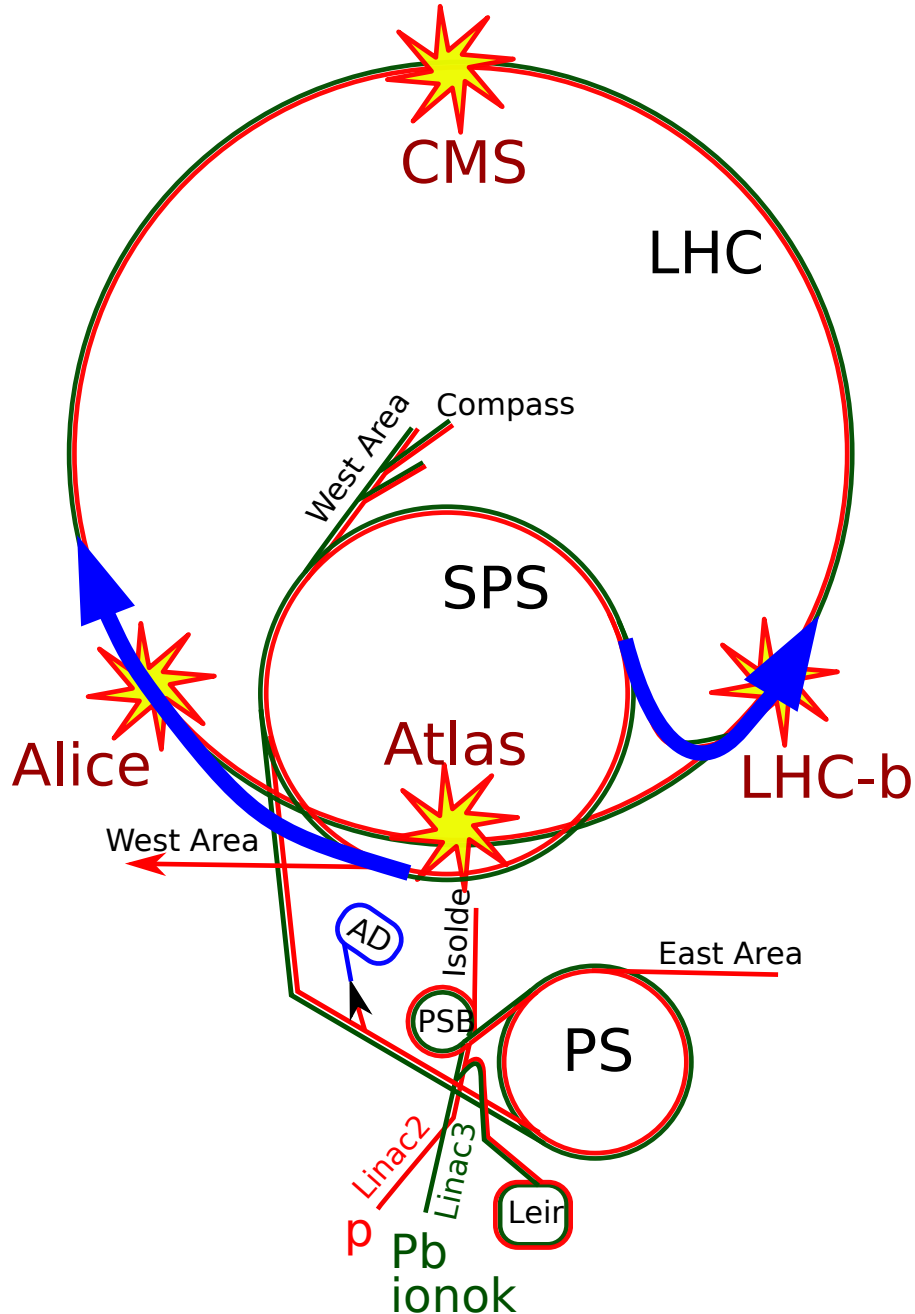
## Miért gyűrű?

- Ugyanaz a gyorsítórezonátor többször is felhasználható
- Szemben futó nyalábokat lehet ütköztetni – jóval nagyobb tömegközépponti energia
- A nem ütköző részecskék “kapnak egy új esélyt”

## Miért több gyűrű?

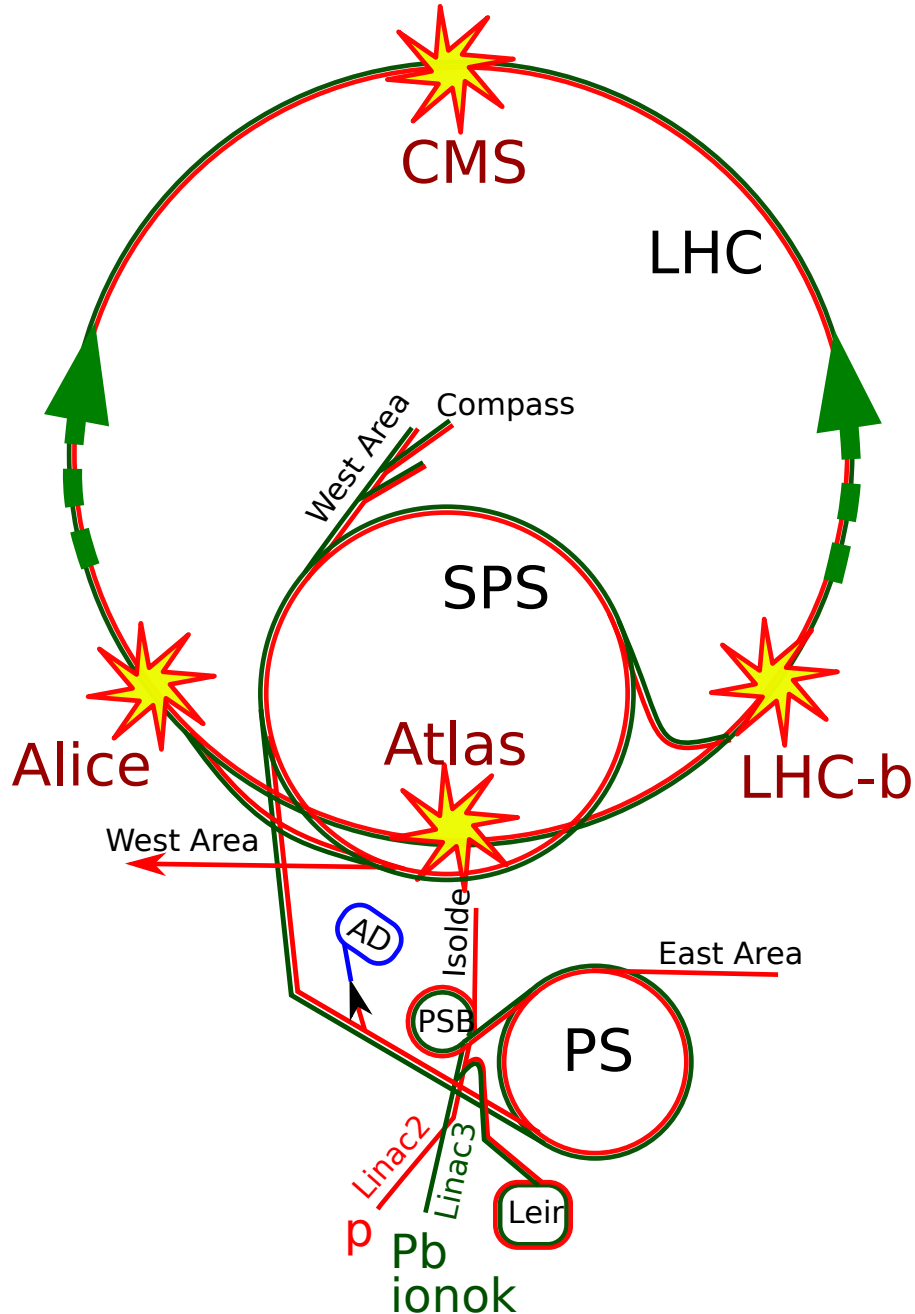
- Egy gyűrű kb. 1 nagyságrendet tud növelni az energián
- Egyre nagyobb gyűrűk

# LHC működési ciklusa



- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban

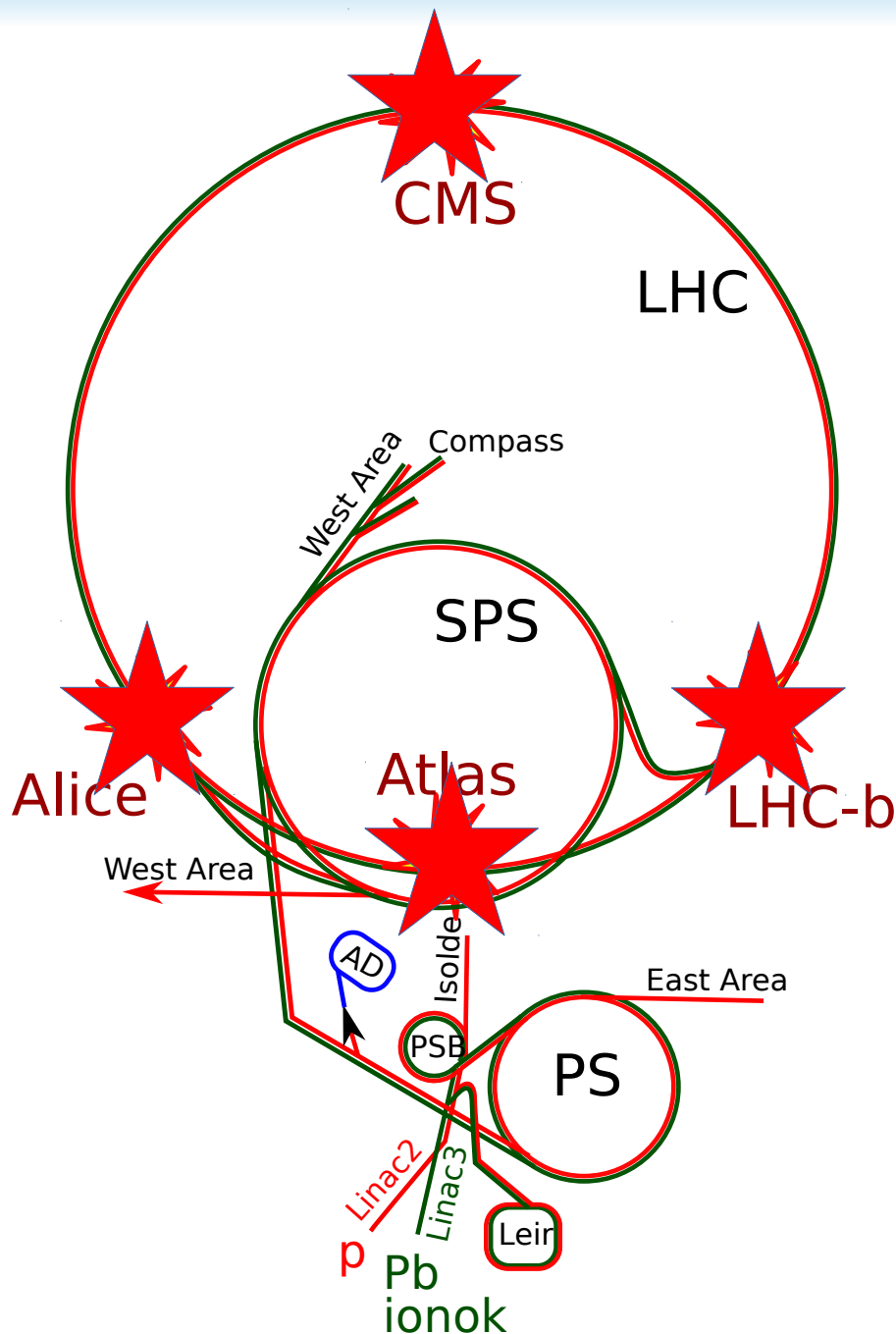
# LHC működési ciklusa



- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban
- Gyorsítás

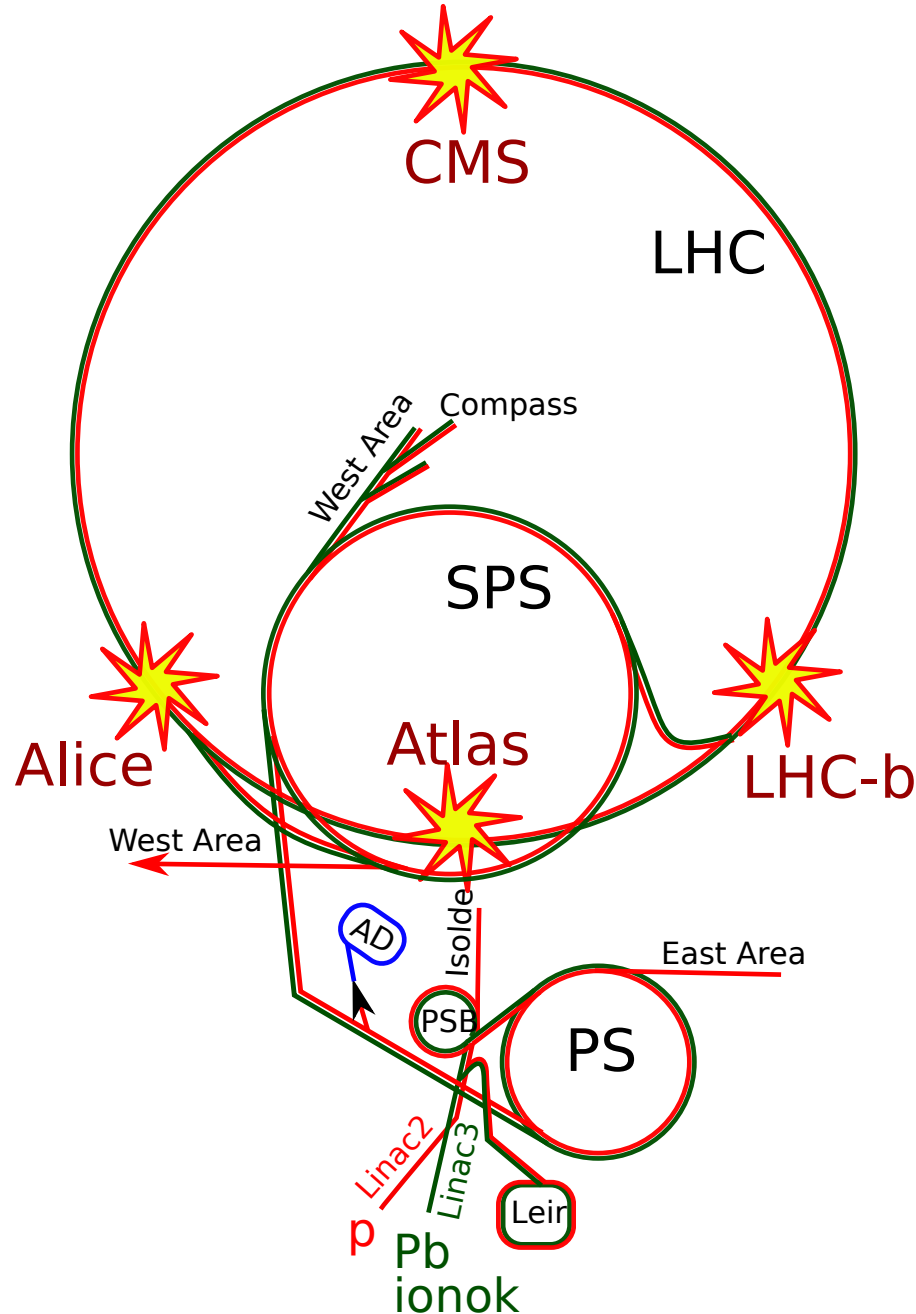


# LHC működési ciklusa



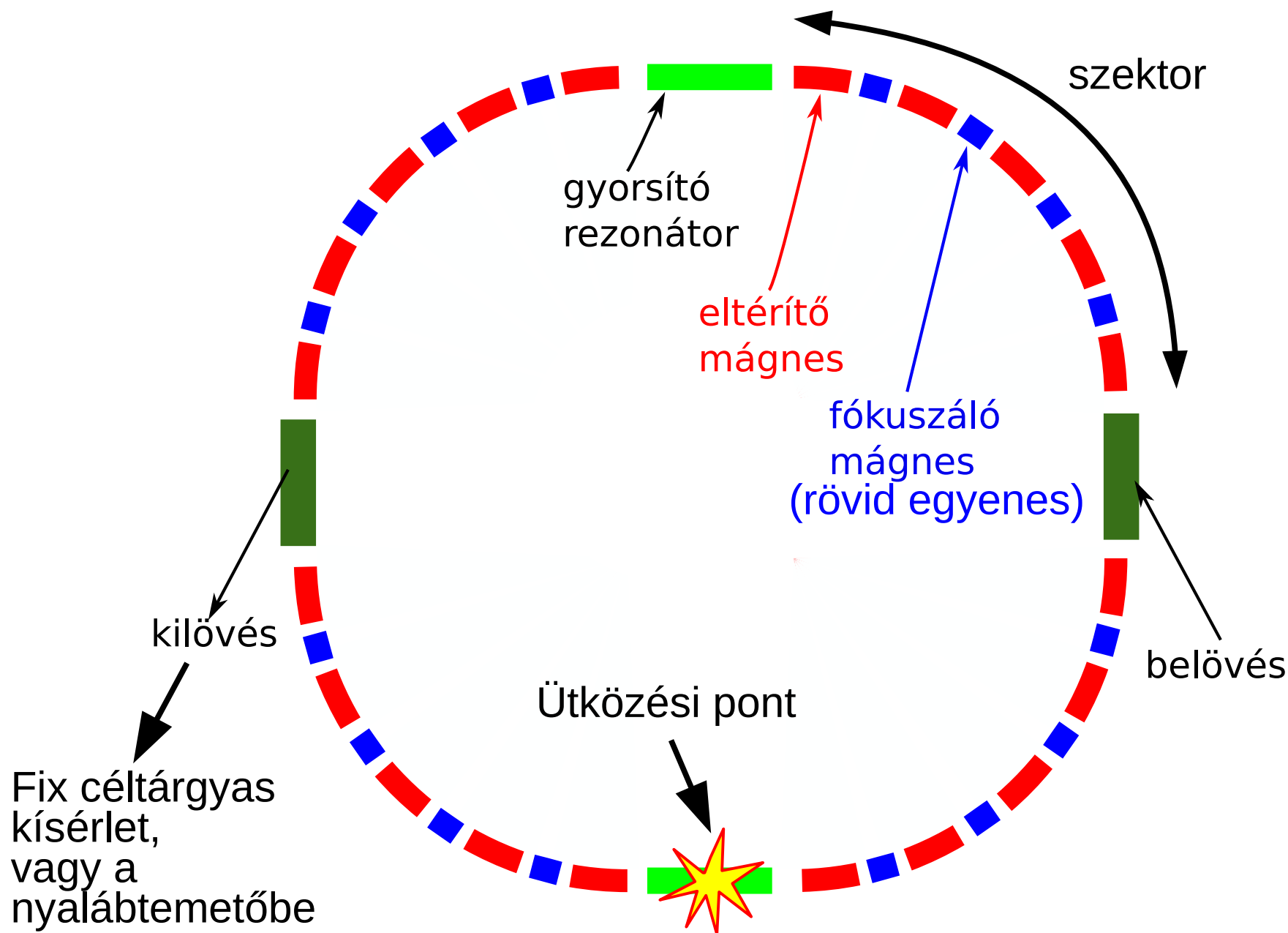
- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban
- Gyorsítás
- **Ütköztetés (~10 óra)**  
(eközben az SPS kiszolgálja az álló céltárgyas kísérleteket)

# LHC működési ciklusa

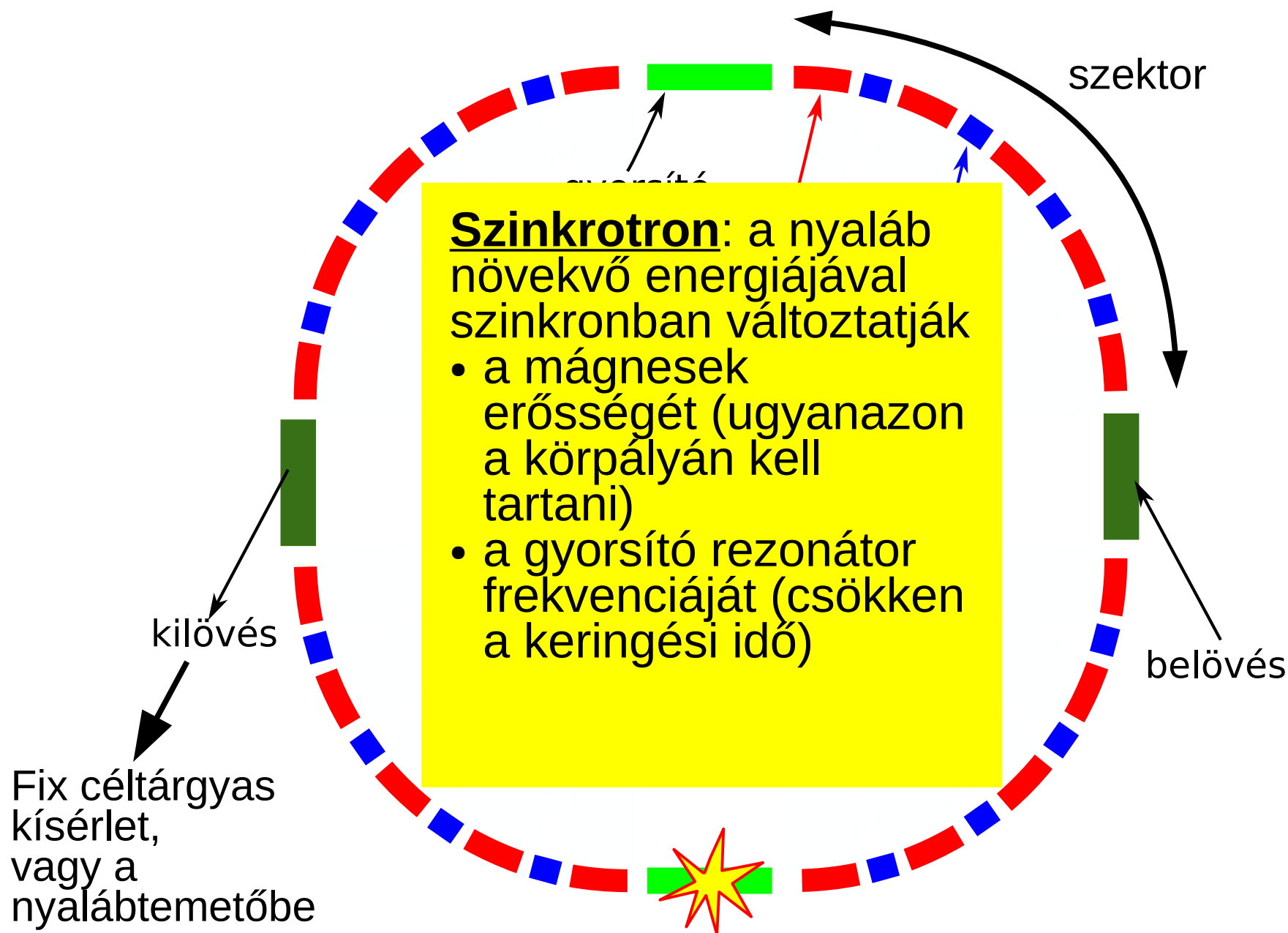


- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban
- Gyorsítás
- **Ütköztetés (~10 óra)**  
(eközben az SPS kiszolgálja az álló céltárgyas kísérleteket)
- Kilövés a nyalábtemetőbe
- Mágnesek terének visszacsökkentése
- Újrainicializáció, stb...

# A gyűrű gyorsítószakasz: szinkrotron

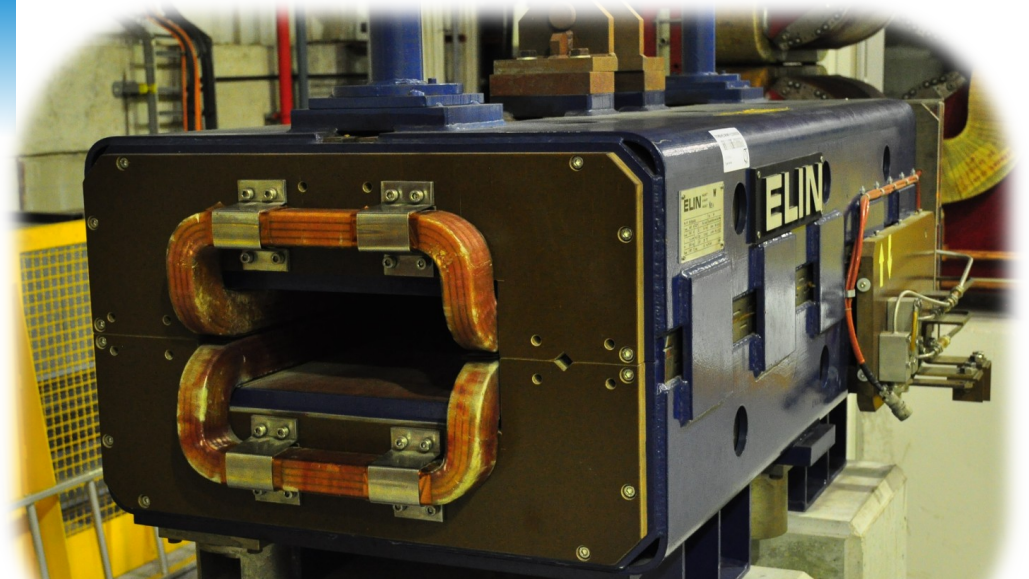


# A gyűrű gyorsítószakasz: szinkrotron

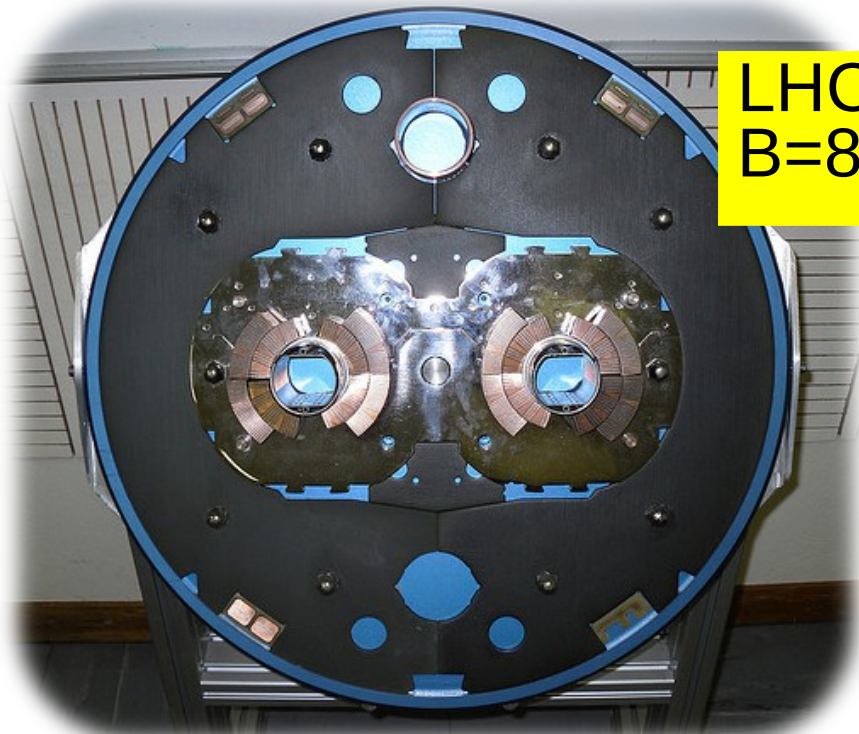


# Eltérítő mágnesek

Cél: homogén mágneses teret létrehozni



Normál vezető dipól mágnes



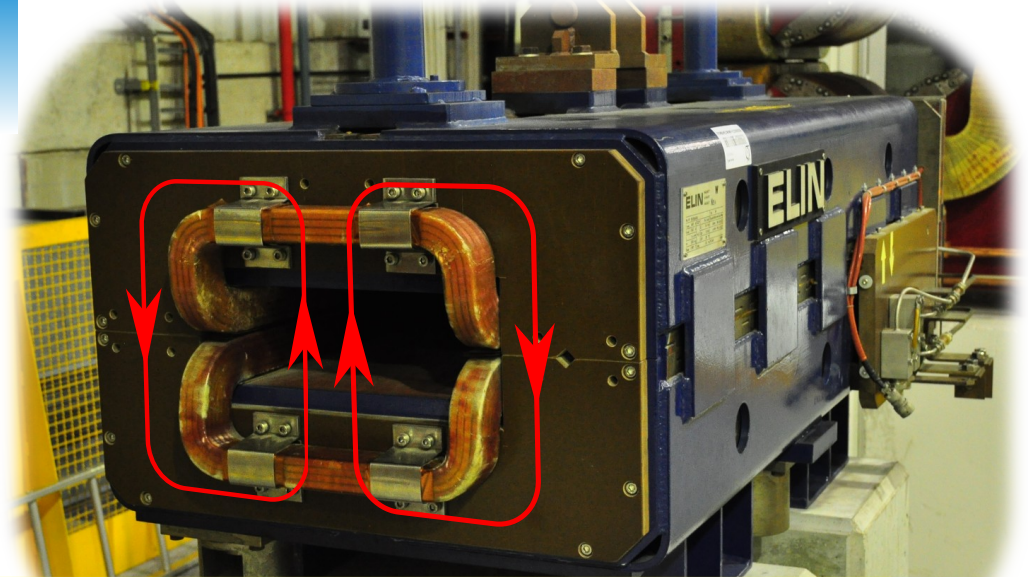
LHC szupravezető mágnesei  
 $B=8.4$  Tesla,  $T=1.9$  Kelvin



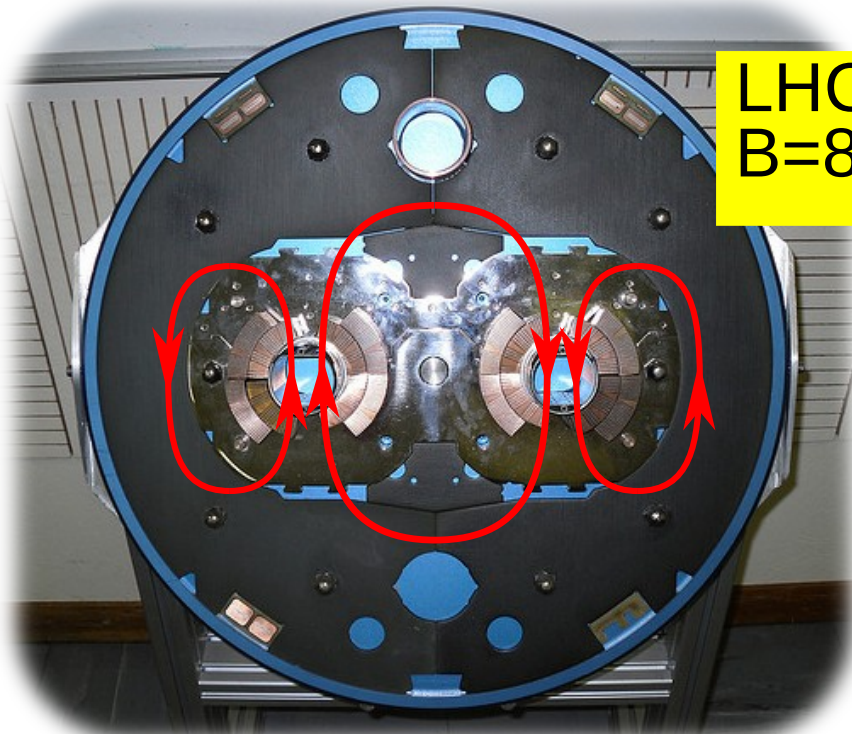


# Eltérítő mágnesek

Cél: homogén mágneses teret létrehozni



Normál vezető dipól mágnes



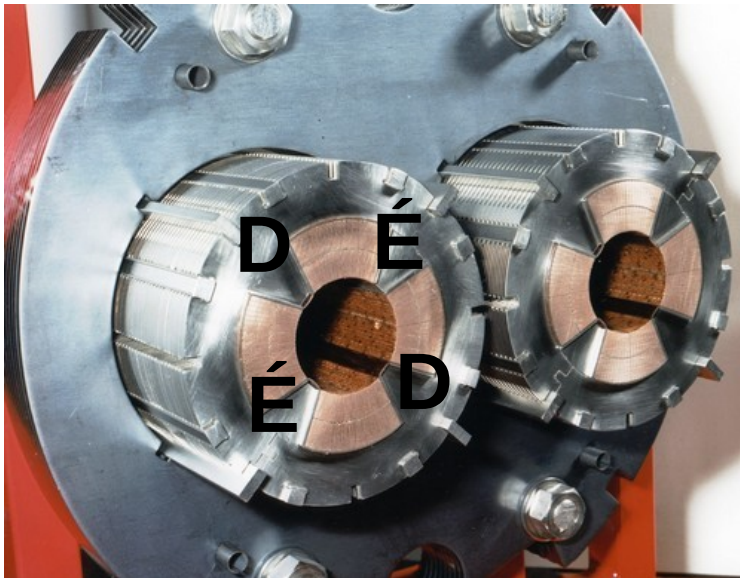
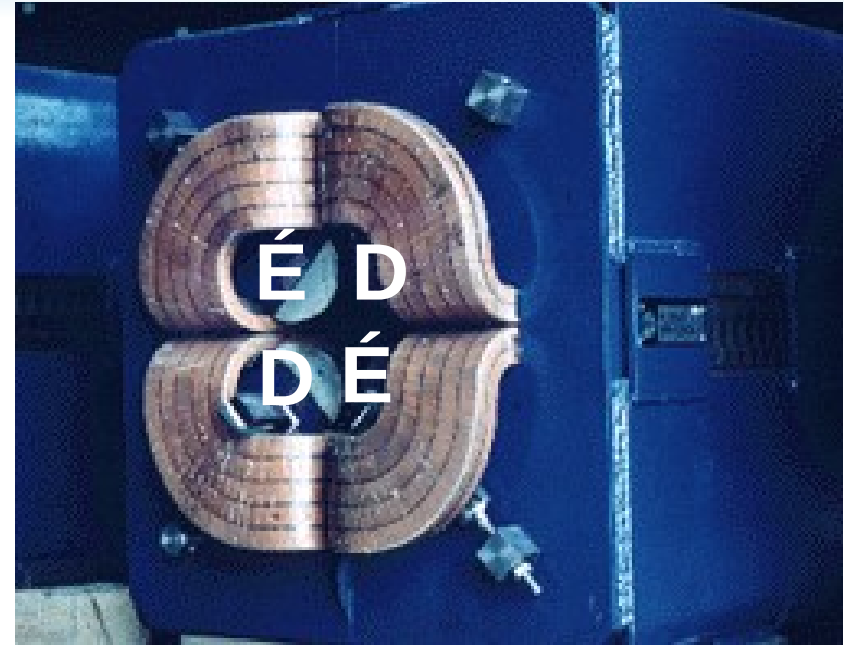
LHC szupravezető mágnesei  
 $B=8.4$  Tesla,  $T=1.9$  Kelvin





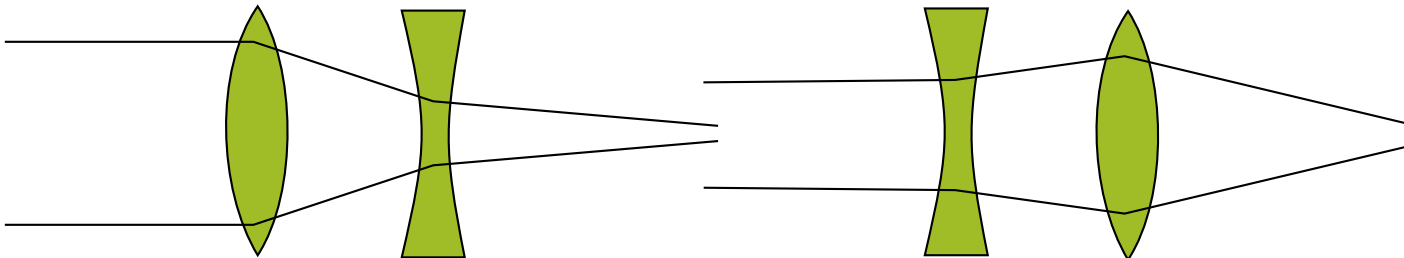
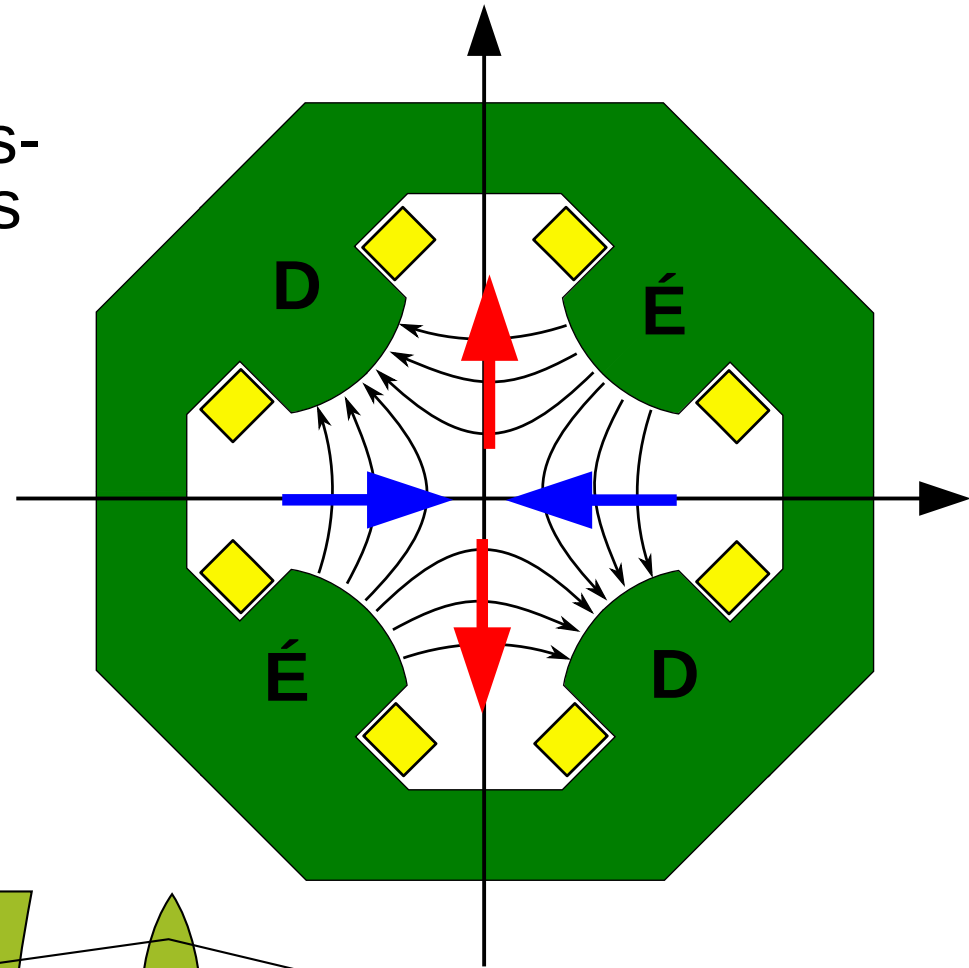
# Fókuszáló mágnesek – az egyenes szakaszokban

- Egy valódi nyalábban mindig kicsit széttartó részecskék vannak
- Az ideális pályától eltérő részecskéket vissza kell téríteni a helyes nyomvonalra



# Fókuszáló mágnesek – az egyenes szakaszokban

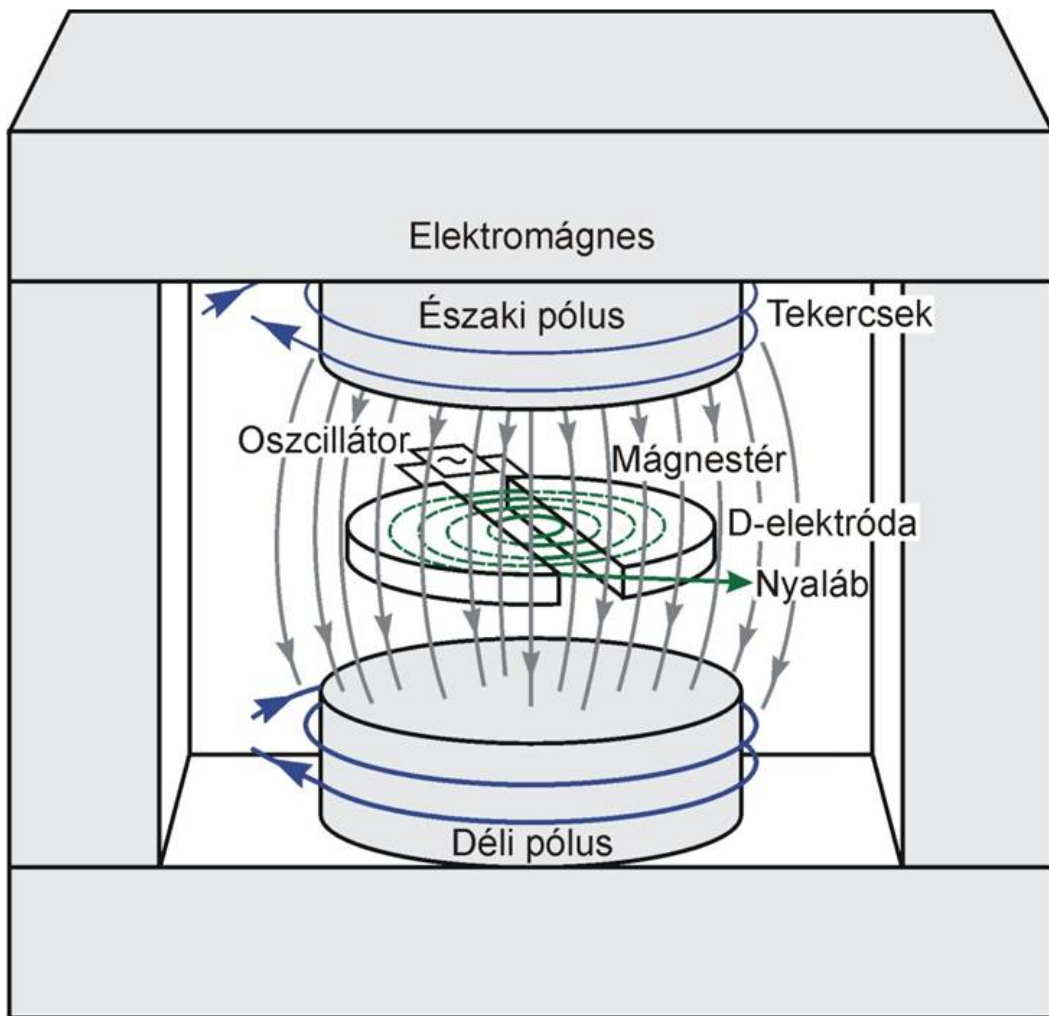
- Egy valódi nyalábbbban mindig kicsit széttartó részecskék vannak
- Az ideális pályától eltérő részecskéket vissza kell téríteni a helyes nyomvonalra
- Egyik síkban **fókuszál**, másikon **defókuszál**
- Váltakozva egymás után: eredő fókuszálás (optikai analógia):



## Más gyorsítófajták:

- **Ciklotron**
- Betatron
- Induction linac
- Microtron
- Rhodotron
- stb...

# Ciklotron



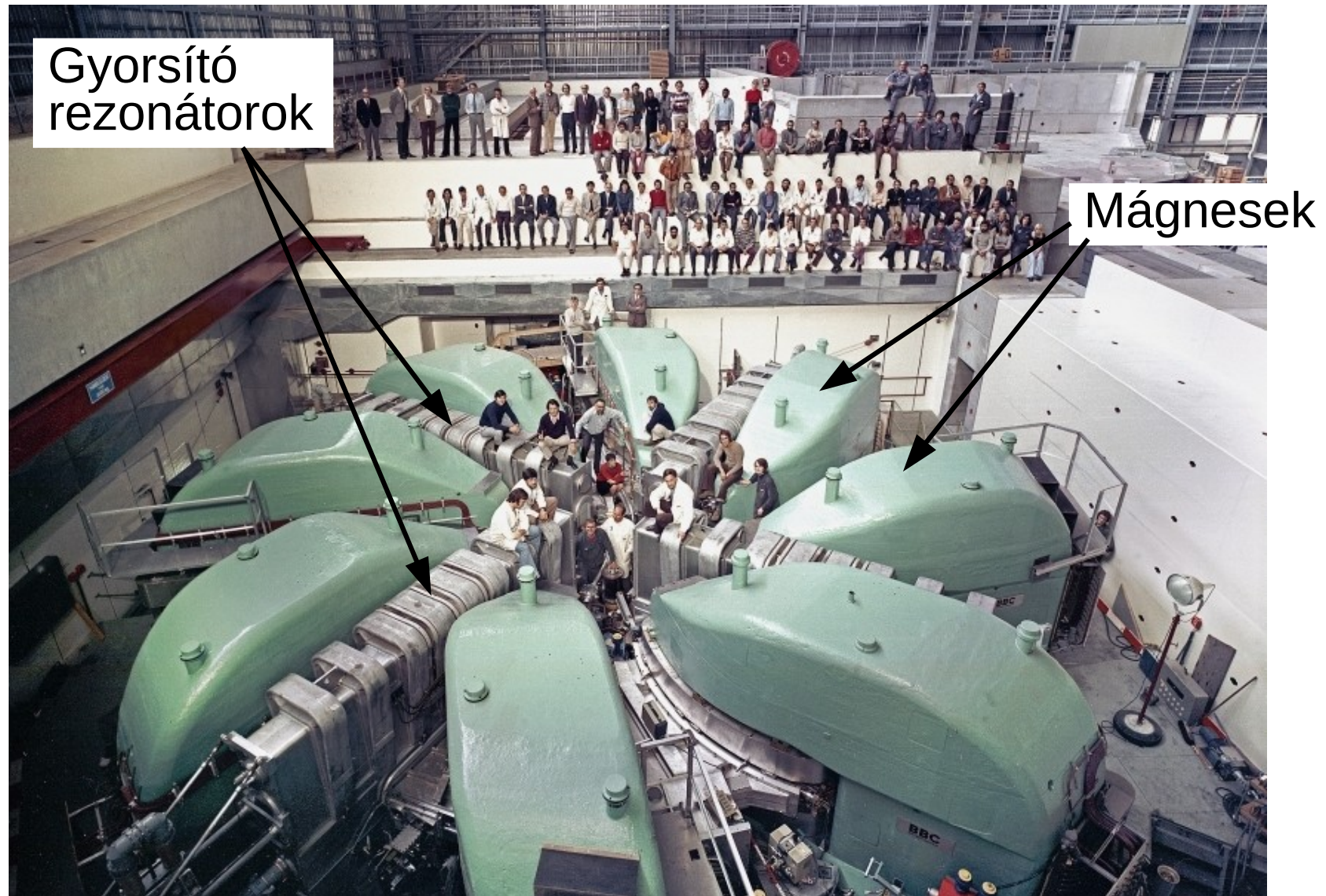
- Amíg nemrelativisztikus:
  - impulzussal arányosan nő
  - a pályasugár (megtett út)
  - sebesség
- A keringési frekvencia tehát nem változik
- Részecske szinkronban marad a gyorsító, váltakozó térrel
- Wideroe linac “felcsavarva”



Lawrence & Livingston: első ciklotron (1931)



# Ciklotron: Paul Scherrer Institut (CH)



- 590 MeV, proton
- Kutatási, ipari célokra



# Ciklotron: Paul Scherrer Institut (CH)

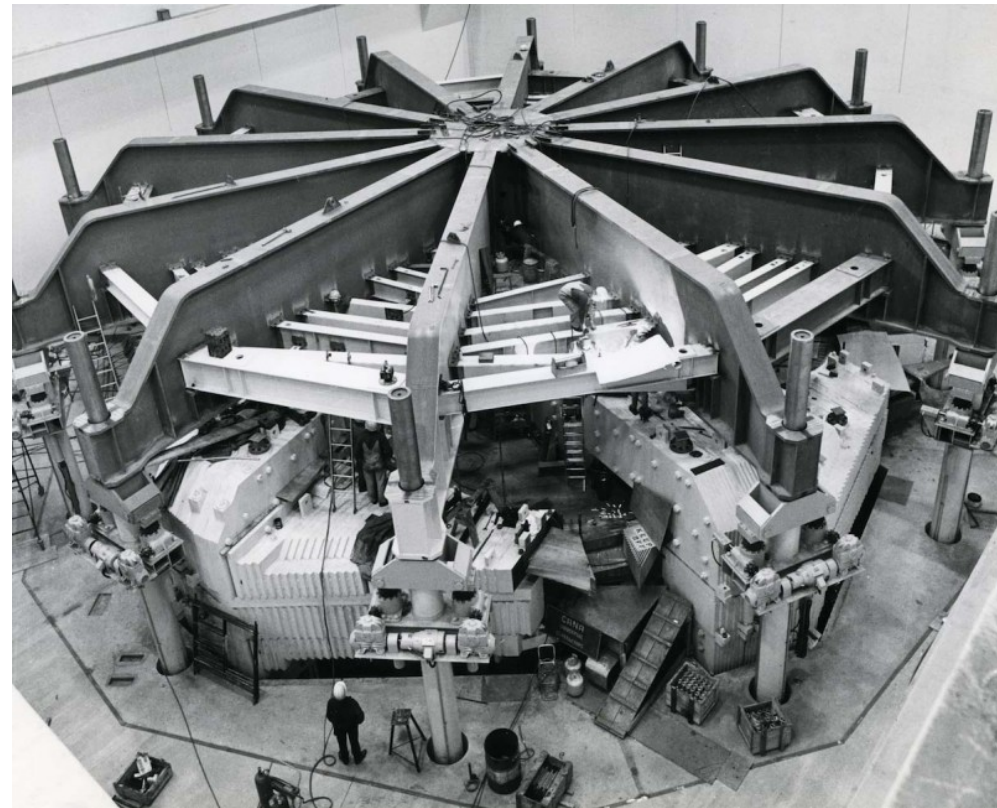
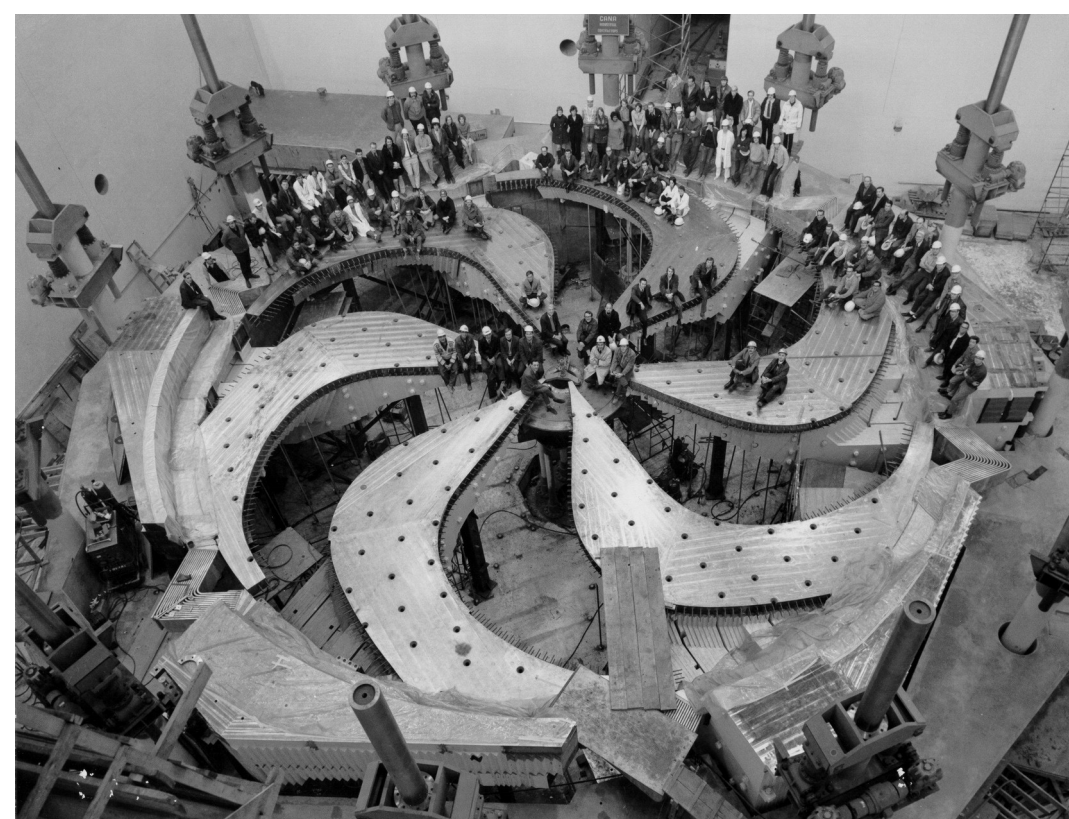
- COMET
- Szupravezető mágnes  
→ kompakt
- 250 MeV, proton
- Sugárterápiás célra





# Ciklotron: TRIUMF (Kanada)

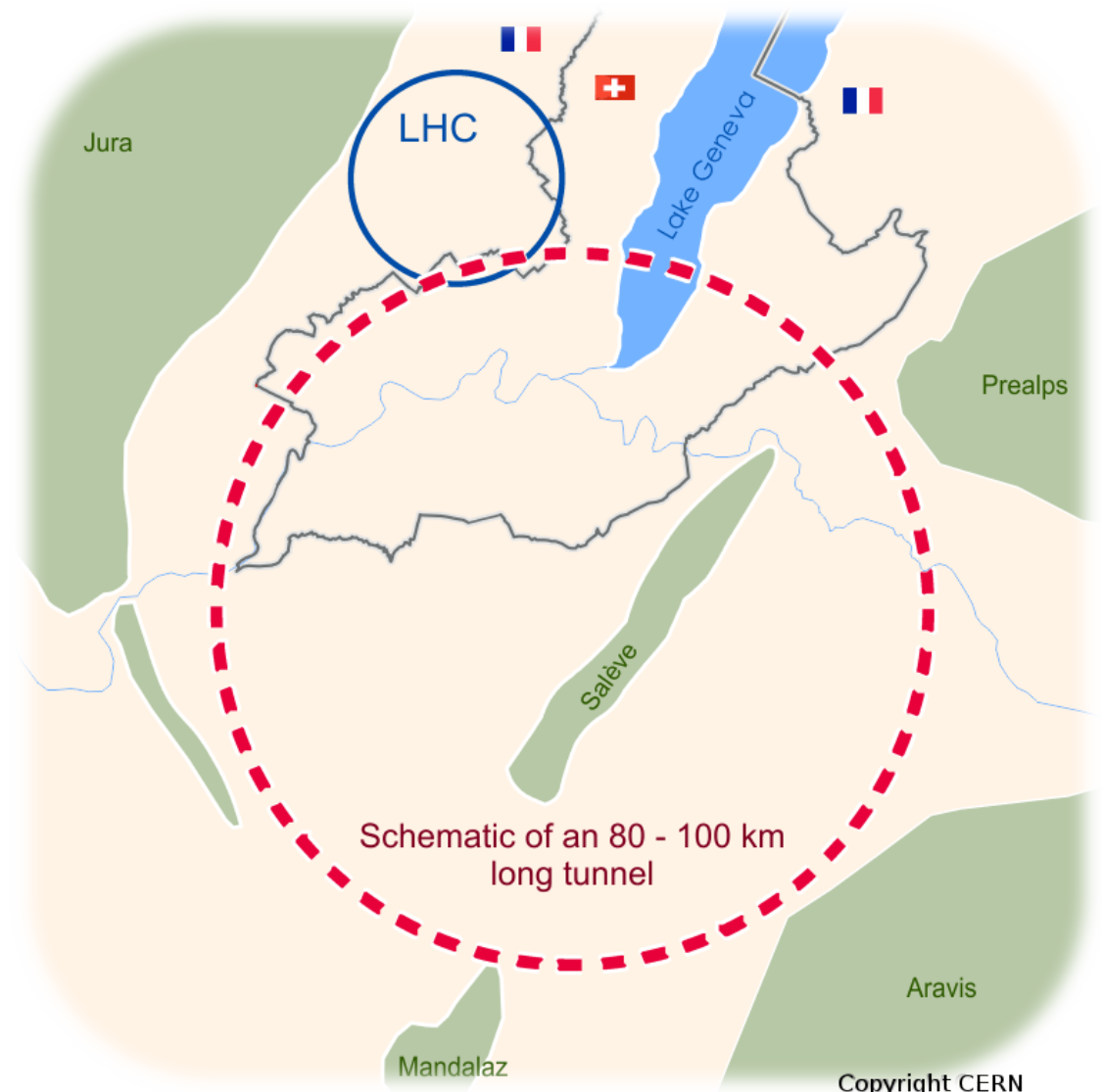
- 520 MeV, proton
- Kutatási célra



# Kitekintés: tervek

# Kitekintés: FCC (CERN)

- FCC – Future Circular Collider
- 100 km kerületű, 50+50 TeV ütközési energiájú proton-proton ütköztető
- Komoly technikai kihívások...
- ...de a gyorsítás elveiben nem új



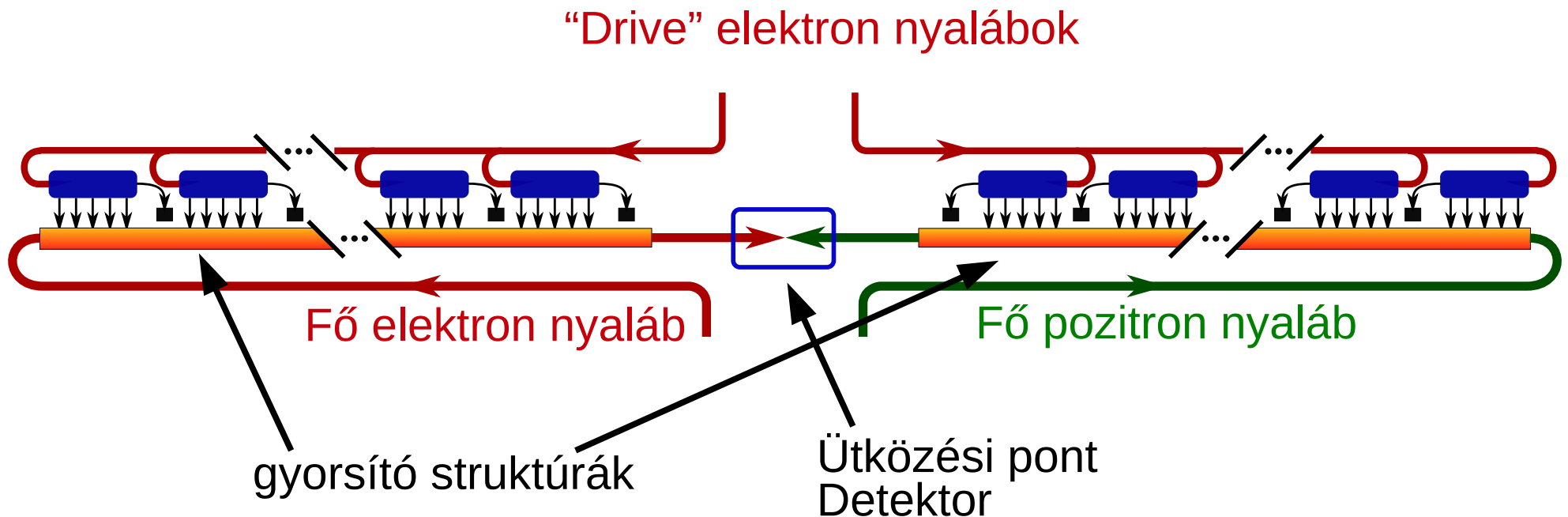


# Kitekintés: Kínai super proton collider

- 52 km kerületű
- 240 GeV ütközési energiájú elektron-pozitron ütköztető
- 35+35 TeV ütközési energiájú proton-proton ütköztető

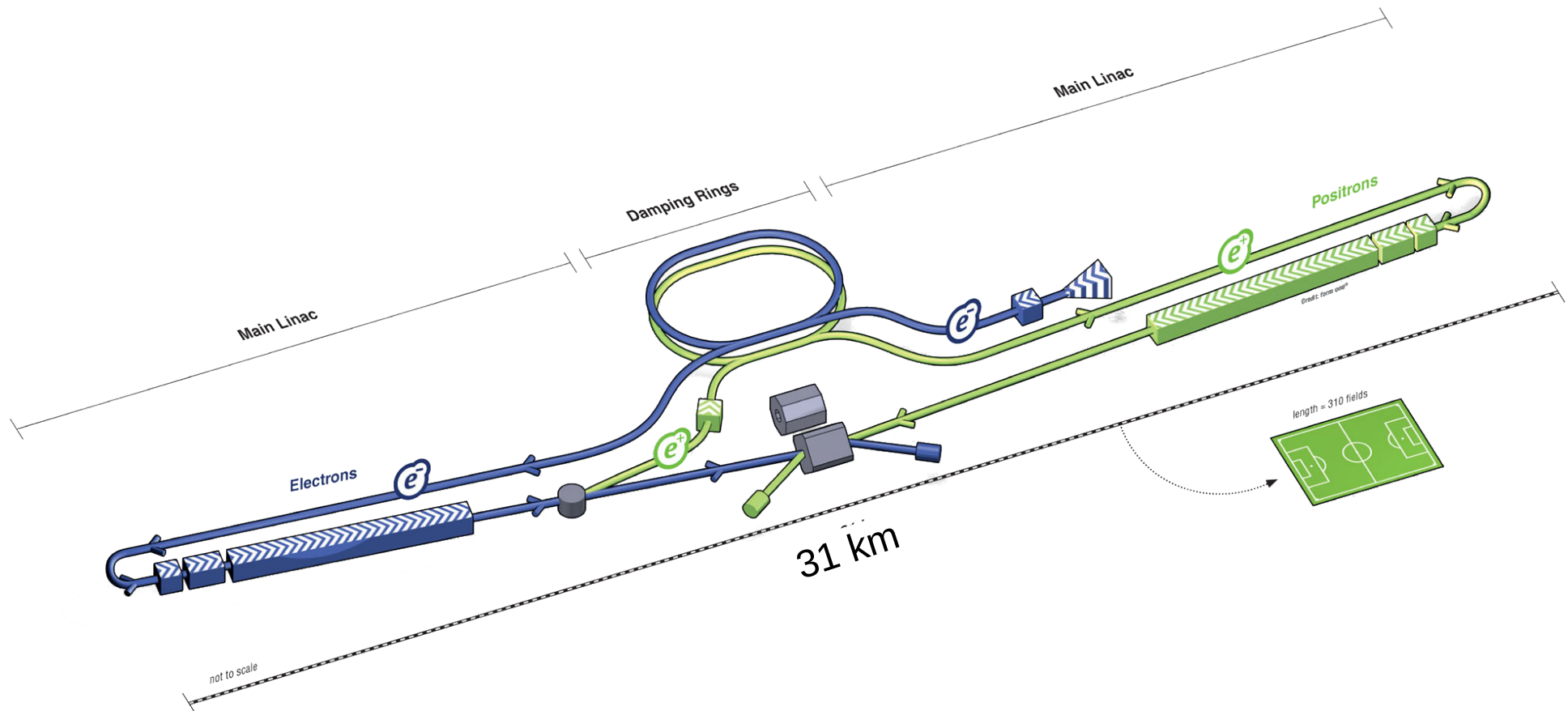
# Kitekintés: CLIC

- **C**ompact **L**inear **C**ollider (@ CERN)
- Lineáris elektron-pozitron ütköztető
- 3 TeV teljes ütközési energia



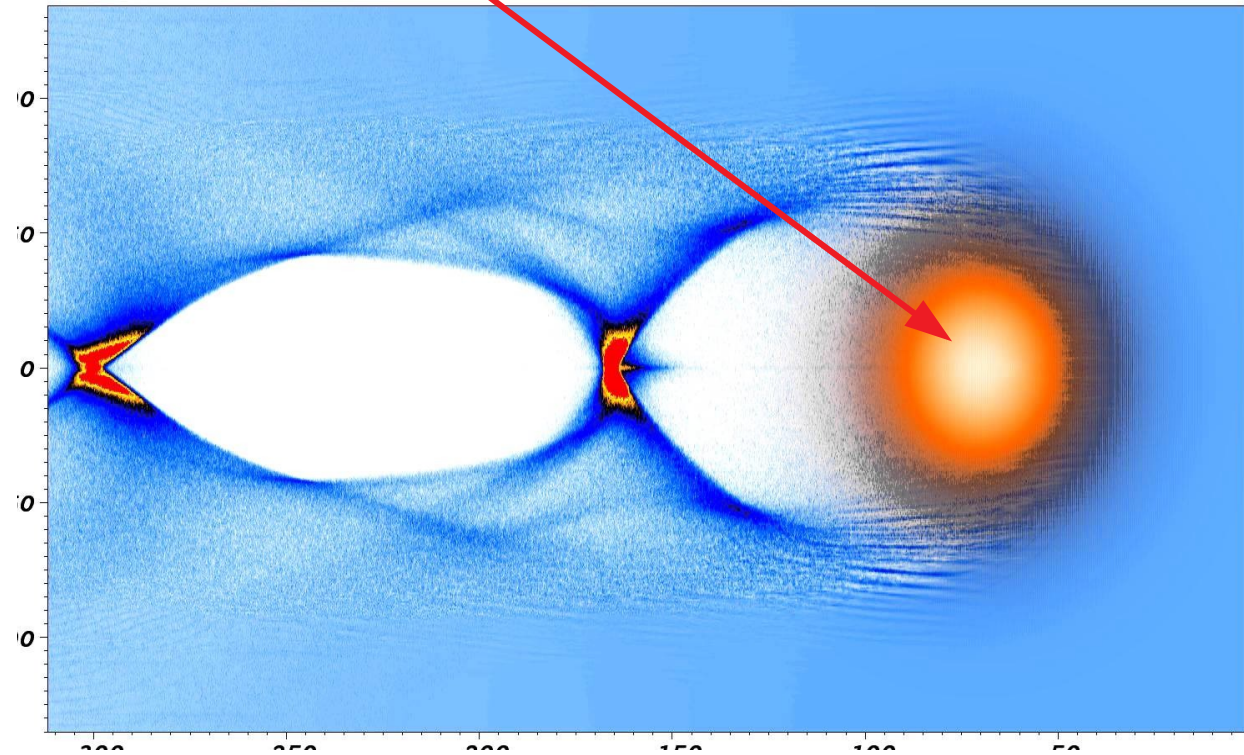
# Kitekintés: ILC

- International **L**inear **C**ollider
- Lineáris elektron-pozitron ütköztető
- 500 GeV ütközési energia, 31 km hossz



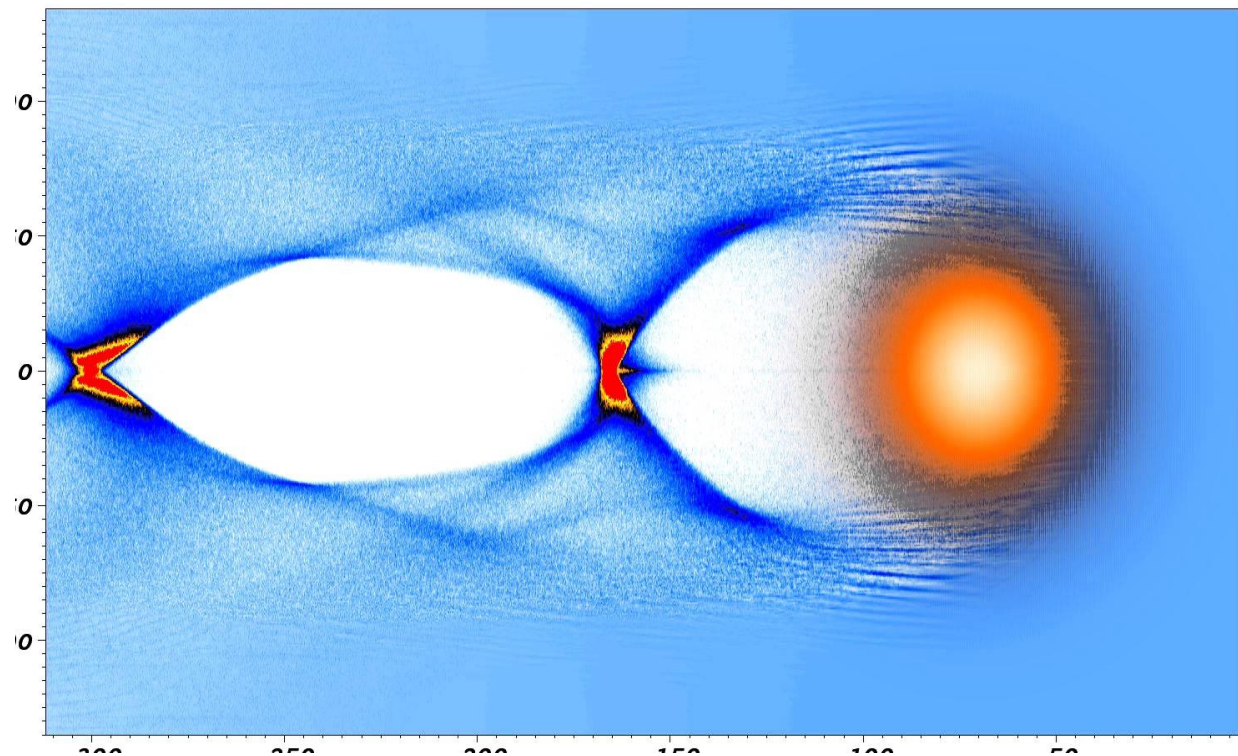
# Gyorsítás plazmában

- Gyorsító elektromos térnek van praktikus korlátja: átütés, ionizáció
  - Ez tönkretelheti a gyorsító struktúrát
  - Ha a gyorsító közeg plazma, azt már nem lehet tönkretenni, és jóval nagyobb elektromos terek léphetnek fel
  - Rettentő intenzív és rövid **lézer impulzus** ionizálja a gázt...
  - ...és szétlökdösi az elektronokat
- 
- Az elektronfelhőben kialakult “buborék” hátulján rettentő erős elektromos tér lép fel
  - Az ide bekerülő elektronokat gyorsítja



# Gyorsítás plazmában

- Hagyományos gyorsító struktúrák (rezonátorok)
  - Példa: CERN PS Booster: 50 m átmérő, 1.4 GeV energia (proton)
  - Szupravezető rezonátorban:  $< 50$  MeV/m (1.4 GeV  $\rightarrow$  min. 28 m)
- Mai rekord plazmában:
  - 9 cm plazma cella  $\rightarrow$  4.2 GeV (elektronok) (maga a lézer viszont szoba nagyságú...)
  - 46 GeV/m
- Új koncepció!
- Nehézségek:
  - több fokozat egymás után nehéz
  - más részecskék, nem csak elektron?





# Összefoglalás

- Akár a mindennapokban is találkozhatunk “részecskegyorsítókkal”, amik ugyanazokat az elveket használják, mint az “igazi” részecskegyorsítók
- Ha nem is “találkozunk” velük, a környezetünk nagyon sok eszközét “gyorsítók gyártották”
- Az egyre nagyobb energiák azért kellenek, hogy
  - egyre kisebb részecskékbe is “bele tudjunk nézni”
  - új, nagy tömegű részecskéket fedezhessünk fel
- Nagy energiákat több gyorsítófokozattal érhetünk el: forrás → lineáris → gyűrű(k)
- Kísérletek lehetnek ütköző-nyalábosak vagy fix céltárgyasak
- Igen ambíciózus gyorsítóépítési tervek...



Ismerős  
valahonnan?

Mit tehettek Ti....?

# .... azért, hogy én ne érezzem ugyanezt?

- Kérdeztek: [barna.daniel@wigner.mta.hu](mailto:barna.daniel@wigner.mta.hu)
- Javasolatok témákat, illusztrációkat, amik felkerülhetnének ide:  
<https://wigner.mta.hu/~barna/index.php?page=Lectures>
- Számoljátok ki a következő kérdéseket, csodálkozzatok el az eredményeken, írjátok meg, ha meglepő volt, javasolatok további érdekes kérdéseket.

# Érdemes kiszámolni (és diákokkal is kiszámoltatni) durva számok fognak kijönni

- 2808 csomag kering 1 irányban,  $10^{11}$  proton van egy csomagban, egy proton energiája 7 TeV. Mekkora a teljes nyaláb energiája? Mekkora tömegű,  $v=100$  km/h sebességű járműnek ugyanekkora a mozgási energiája?
- Mekkora tömegű vasat tudna megolvasztani ez az energia?
- 1 eltérítő (dipól) mágnesben tárolt mágneses energia 7 MJ. Mekkora sebességre lehetne felgyorsítani ezzel az energiával egy 1 tonnás járművet?
- A teljes LHC-ban 1232 (ezerkétszázharminckettő!) dipól mágnes van. Mekkora az ezekben tárolt összes energia? Mi történik ezzel az energiával amikor a gyűrűt újrainicializálják a következő ciklusra?
- Az LHC kerülete 27 km. Egy ütközési ciklus tipikusan 10 óra. Mekkora utat tesznek meg ez alatt a részecskék? Ez alatt hányszor mennek át a svájci-francia országhatáron?

# Ami az eddigiekből kimaradt, de nagyon érdekes és elgondolkodtató

- Hogyan tudjuk a részecskéket a gyűrűkből ki, illetve a gyűrűkbe belőni?
- Nem taszítják egymást a nyaláb azonos töltésű részecskéi? Hogyan maradnak mégis együtt nyalábként?
- Mi történik, ha egy szupravezető mágnes “elszáll” (quench) és egy kis ponton normál vezetővé válik?
- Mi történik ekkor a nyalábbal?
- Hogyan tudunk egyáltalán megszabadulni ettől a borzalmas energiát tároló nyalábtól?
- A gyorsításhoz a részecskéknak csomagokban kell érkezniük. Hogyan maradnak együtt órákon keresztül, “csomagokban”, jóllehet a sebességük mindig kicsit eltérő?



# Mit tehettek Ti, hogy ne történjen ez?



Hirdessétek, hogy már gimnazista korban is ki lehet jönni a CERN-be, és részt venni a munkában

- Szakály Marcell (2017 és 2018 nyár)  
Fazekas Mihály gimnázium, Budapest – gyorsítók [Barna D.]
- Veres Dóra Erzsébet (2018 nyár)  
Fazekas Mihály gimnázium, Budapest – gyorsítók [Barna D.]
- Kiss Gergely (2018 nyár)  
Fazekas Mihály gimnázium, Budapest – infó [Máthé Zoltán, Krasznahorkay Attila]