

Részecskegyorsítók

Barna Dániel

barna.daniel@wigner.mta.hu

Wigner Fizikai Kutatóközpont

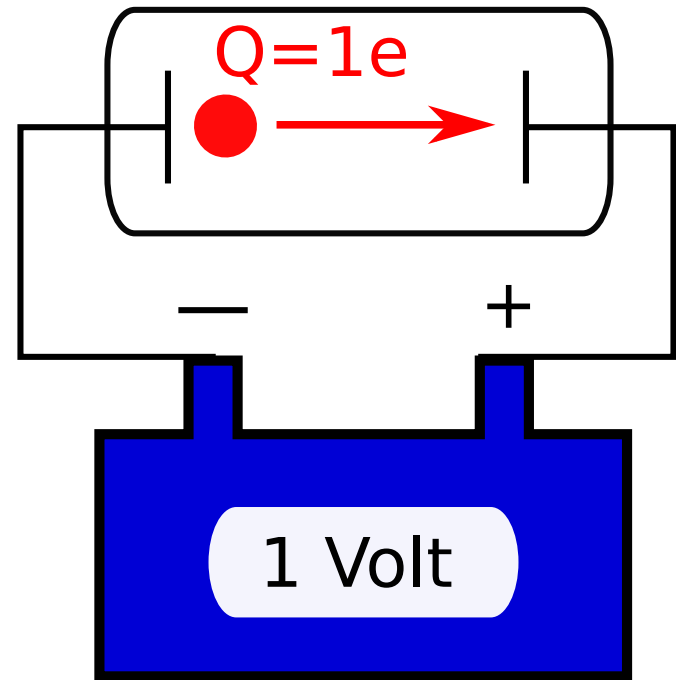
- Mértékegységek, töltött részecskék manipulálása
- Részecskegyorsítók a mindennapi életünkben
- Miért akarunk nagyenergiás gyorsítókat?
- A klasszikus nagyenergiás gyorsítók részei és alapelvek
- Egyéb gyorsító típusok
- Kitekintés, tervek...

Mértékegységek

Töltött részecskék manipulálása

Energia mértékegység

- 1 elektronvolt = $e \cdot V$
- 1 elemi töltésű részecske 1 Volt potenciálkülönbség befutása során szerzett energiája
- eV, keV, MeV, GeV, TeV



Töltött részecskék manipulálása

Mágneses tér: B

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

- Mindig merőleges a sebességre
- 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

Töltött részecskék manipulálása

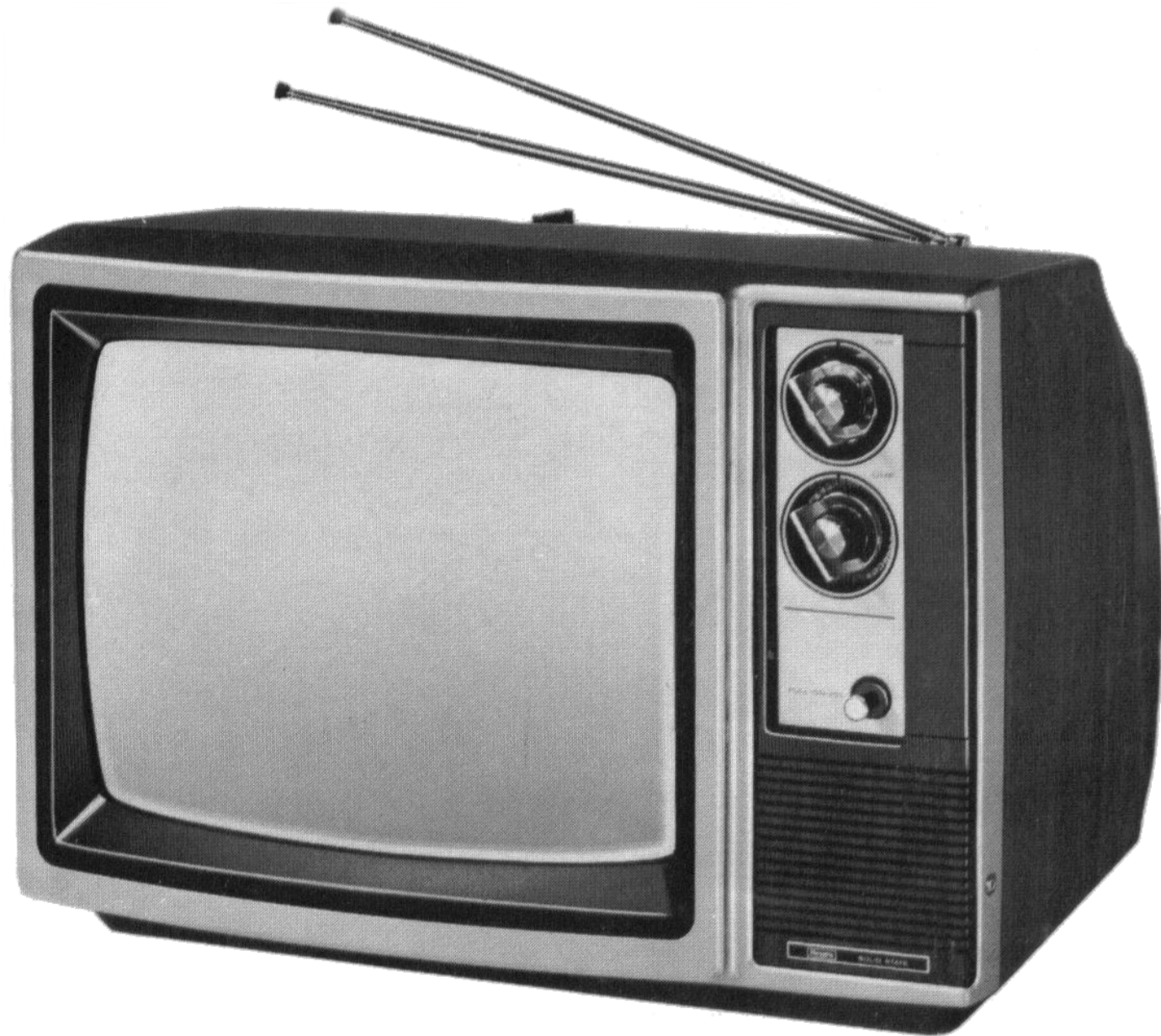
- MINDIG az elektromos tér gyorsít
- (de rengeteg módja van, hogy hogy állítsuk elő ezt az elektromos teret)
- Nagyenergiás részecskegyorsítóknál tipikusan mágnesek térítik el (tartják körpályán, fókuszálják) a nyalábot
- “Gyorsítómágnes” = a gyorsító mágnes
≠ olyan mágnes ami gyorsít

Részecskegyorsítók a mindennapi
életünkben, a háztartásban

Ez talán mégsem egy
részecskegyorsító....



Katódsugaras TV

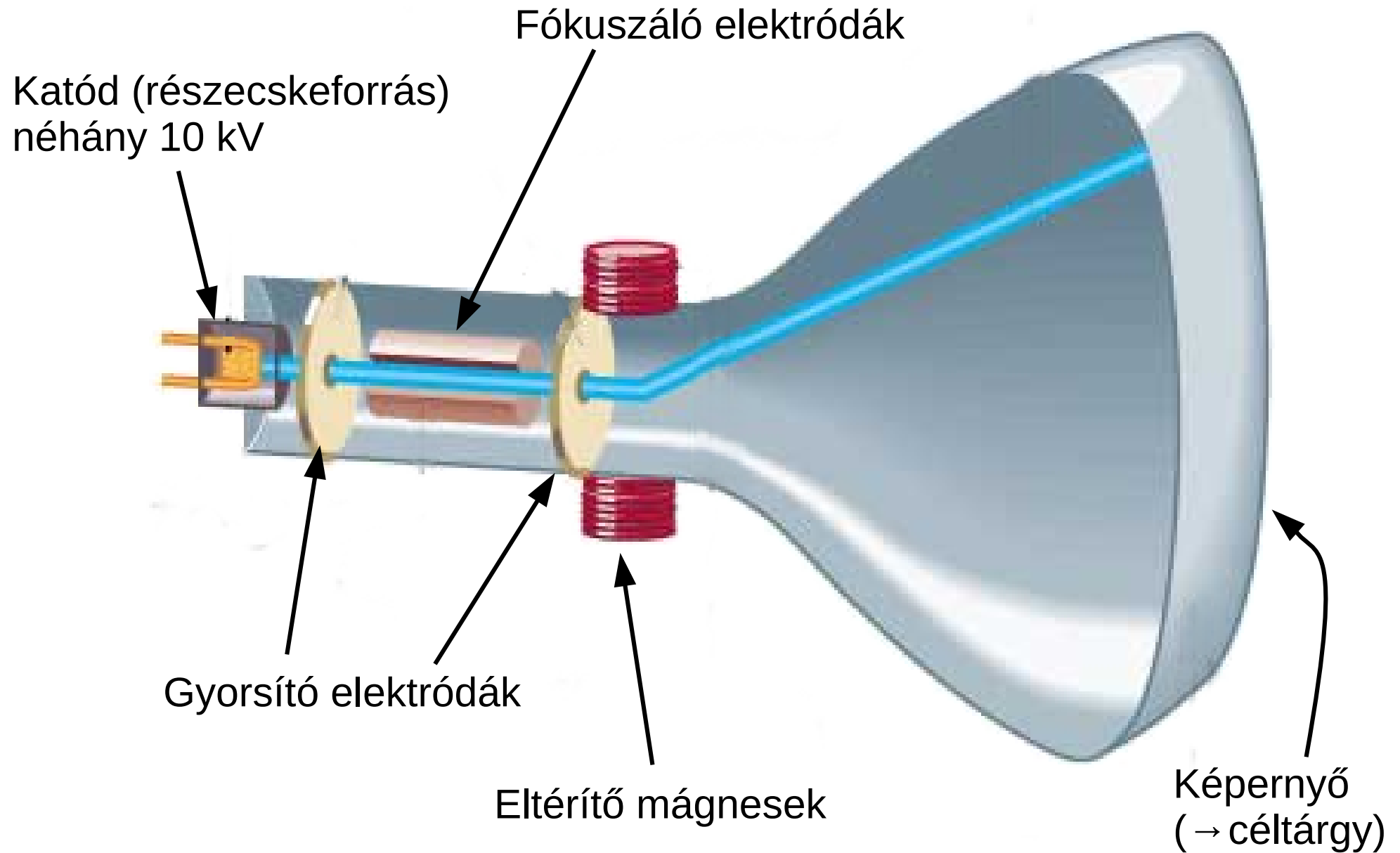


Katódsugaras TV



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

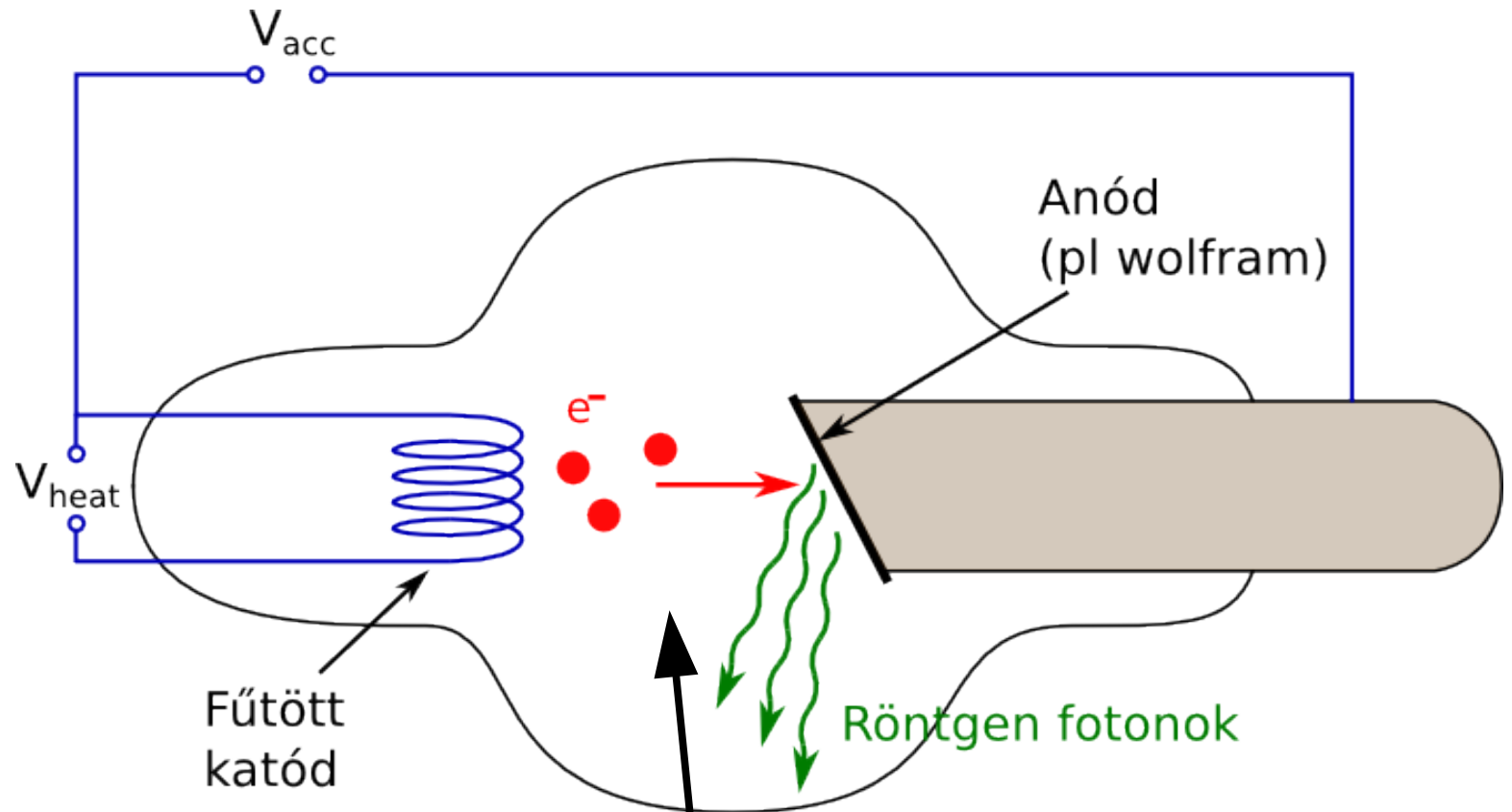
Katódsugaras TV



Katódsugaras TV

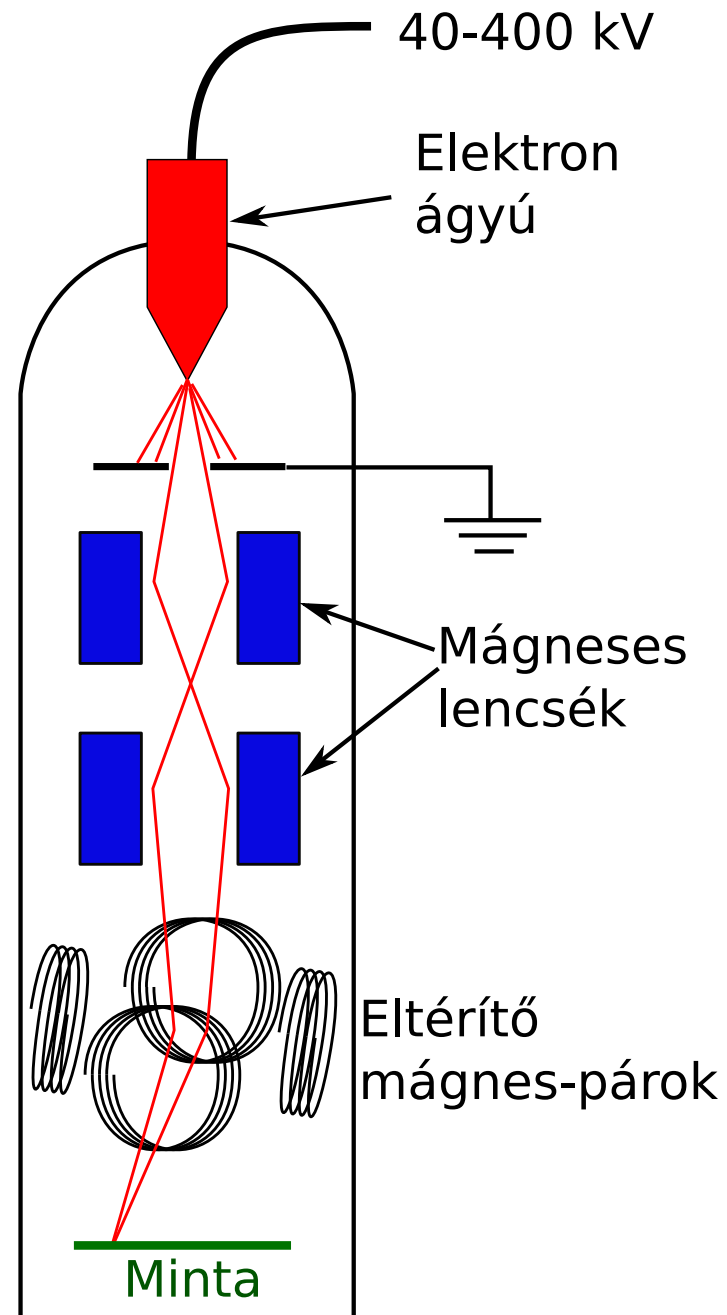
- Ne dobjuk ki a régi TV-t, vigyük be a fizika szertárba!
- Ki tudja meddig találunk még ilyen egyáltalán
- Olcsó és nagyon tanulságos szemléltetőeszköz
- Egy erős mágnessel (pl. rossz merevlemezből lehet kiszerezni) lehet demonstrálni a mágneses tér hatását az elektronokra

Röntgen-cső



10-100 keV mini
elektrosztatikus
elektron-gyorsító

Elektron mikroszkóp



Részecskegyorsítók felhasználása világszerte

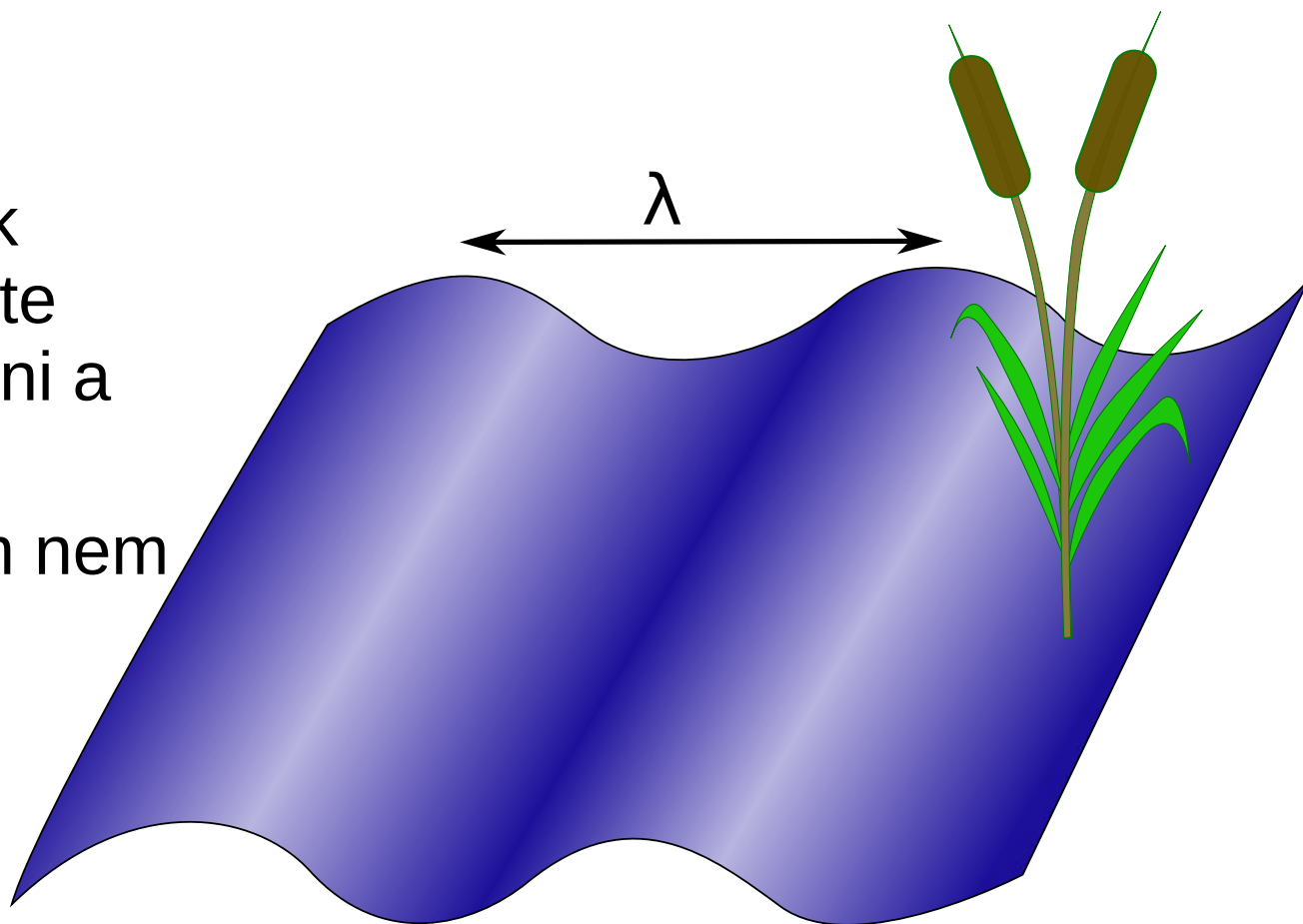
- Világszerte kb. 26000 részecskegyorsító üzemel
- 44% sugárterápiás kezelés (60-250 MeV)
- 41% ion implantáció (~ 100 keV nagyságrend), pl
 - félvezető gyártás (számítógépek, mikroelektronika)
 - fém felületkezelés (pl nitrogén implantáció) késekbe, fúróhegyekbe
- ipari alkalmazás, kutatás
- élelmiszeripar (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?

Apropó mikroszkóp....

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

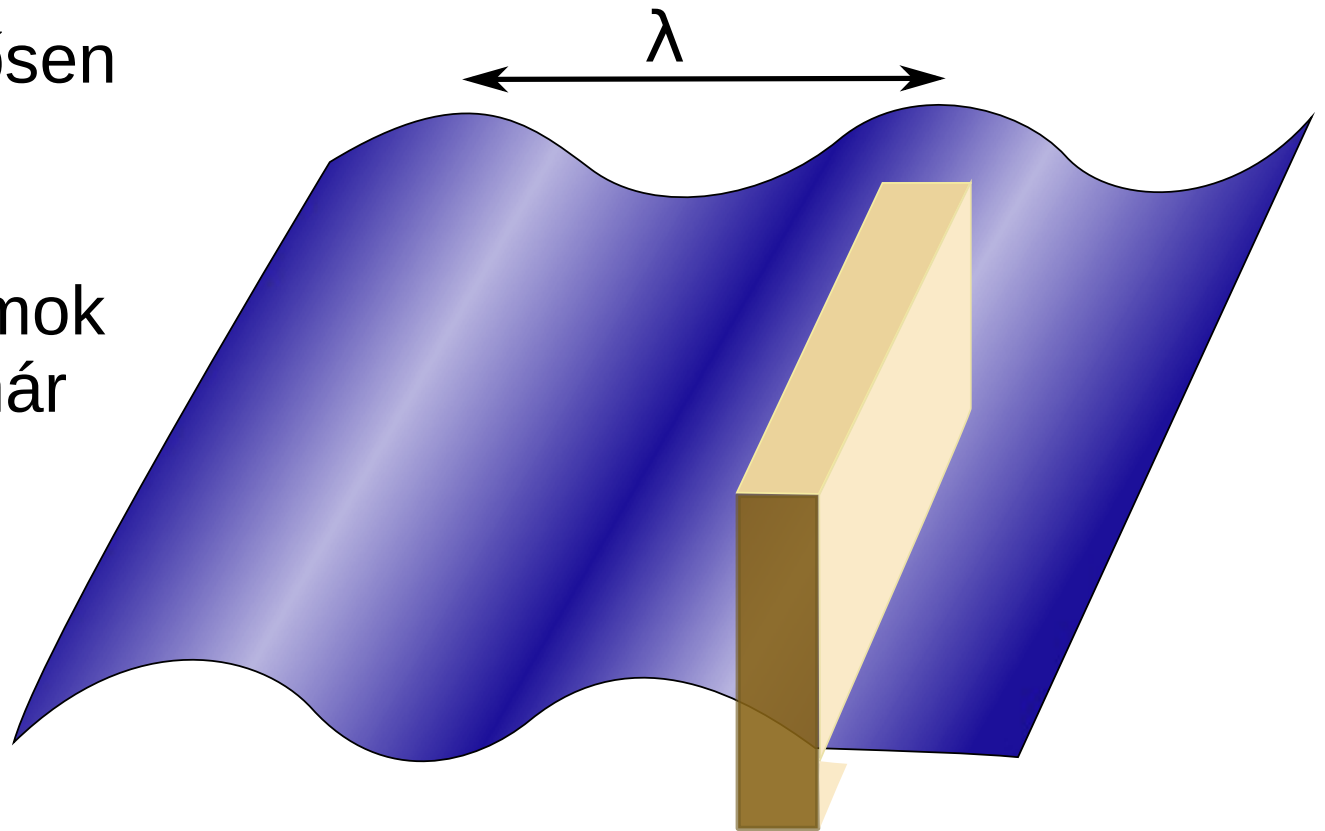
- Nádszál $\ll \lambda$
- A nádszál “nem sok vizet zavar”, mögötte nem fog megváltozni a hullámforma
- Ez a hosszú hullám nem alkalmas a kis objektumok feltérképezésére



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 (λ) objektumok feltérképezésére már használható ez a hullám

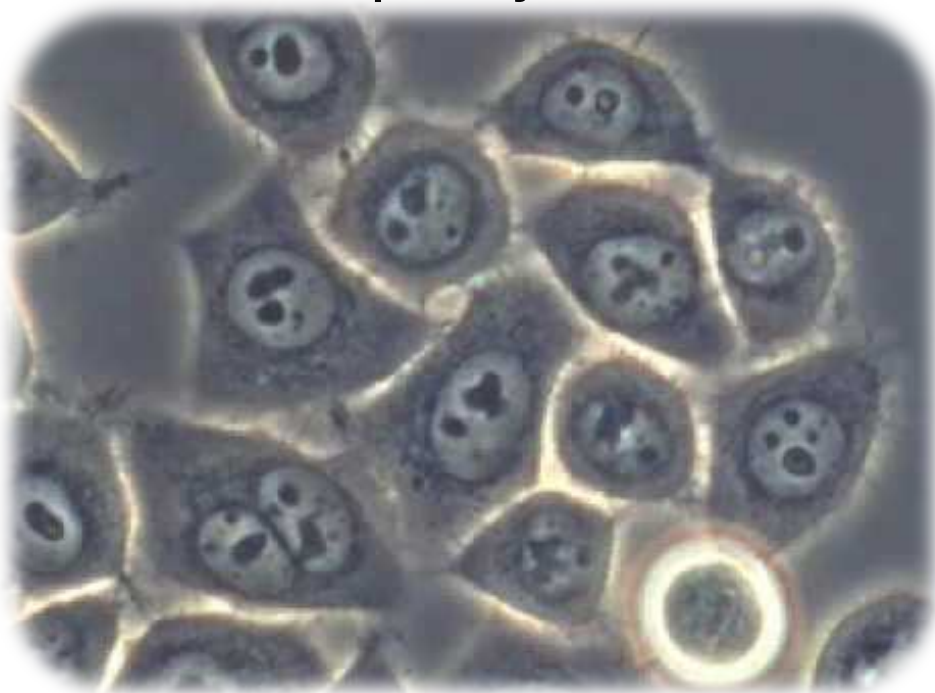


Apropó mikroszkóp....

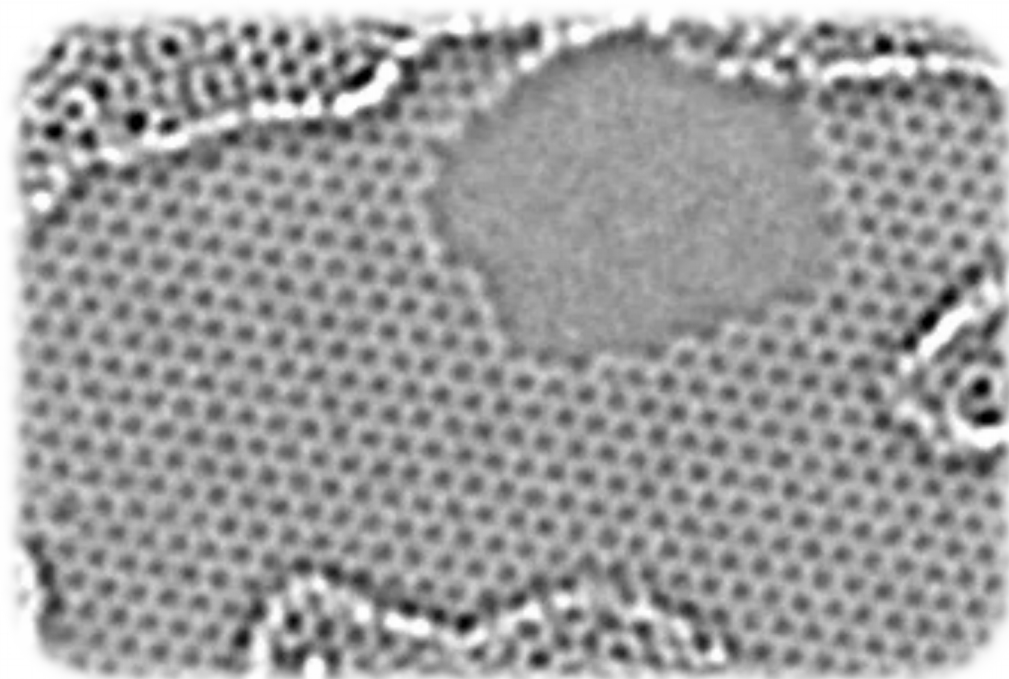
de Broglie összefüggés: $\lambda = \frac{h}{p}$

Nagyobb energia → rövidebb hullámhossz → nagyobb felbontás

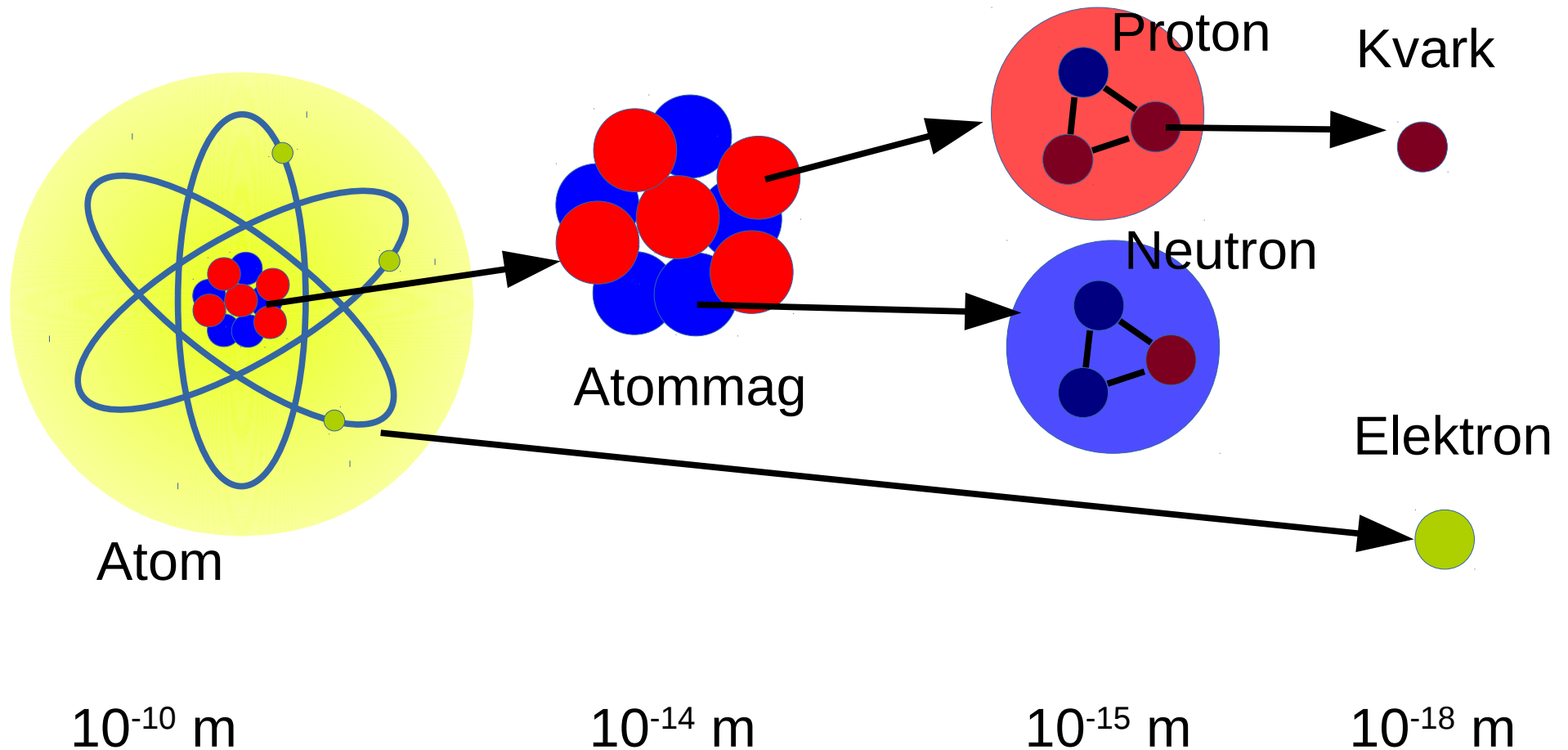
Fény: pár száz nm
pl sejtek



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

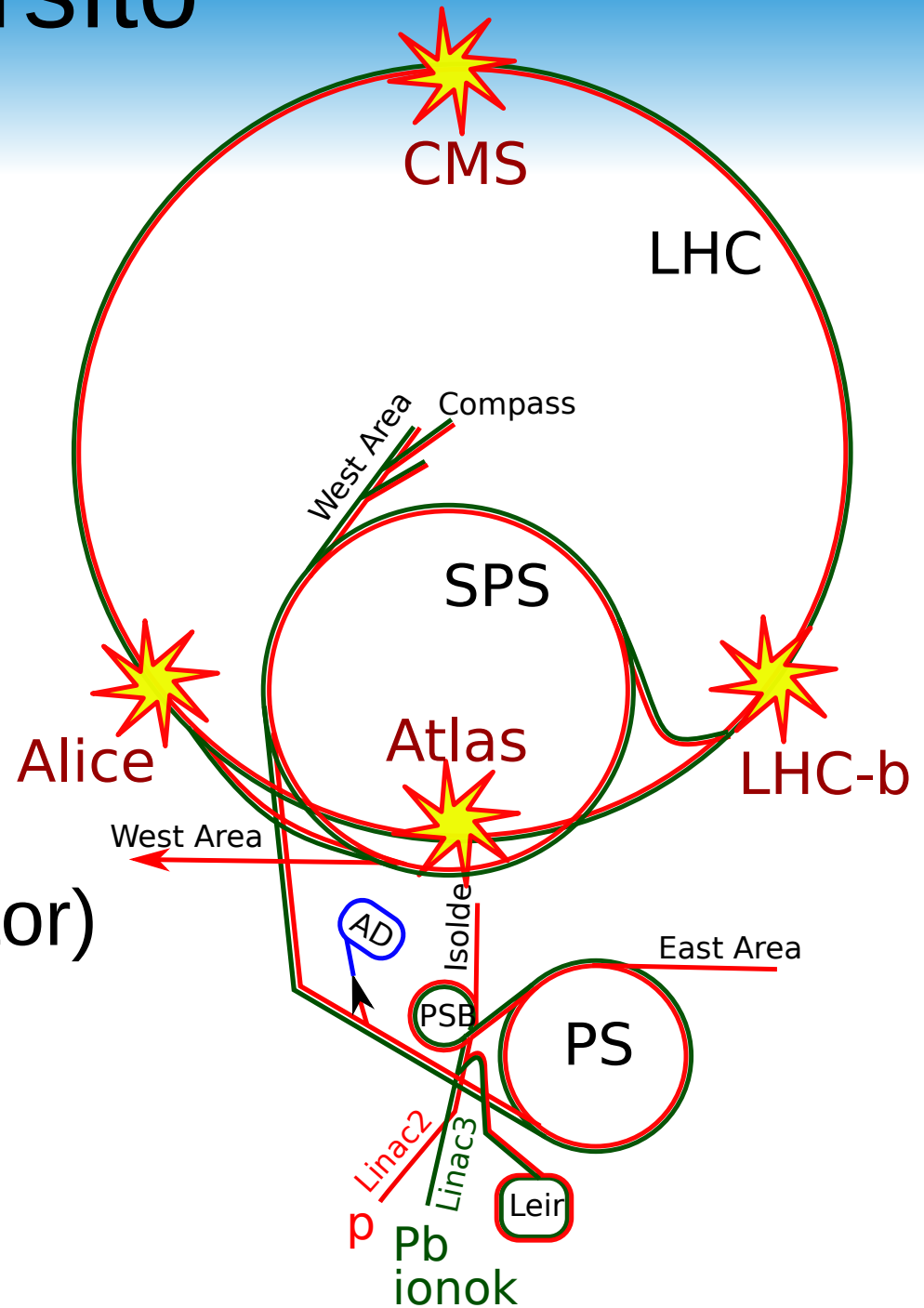
Miben más még mint a “hagyományos” mikroszkópok?

- 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.

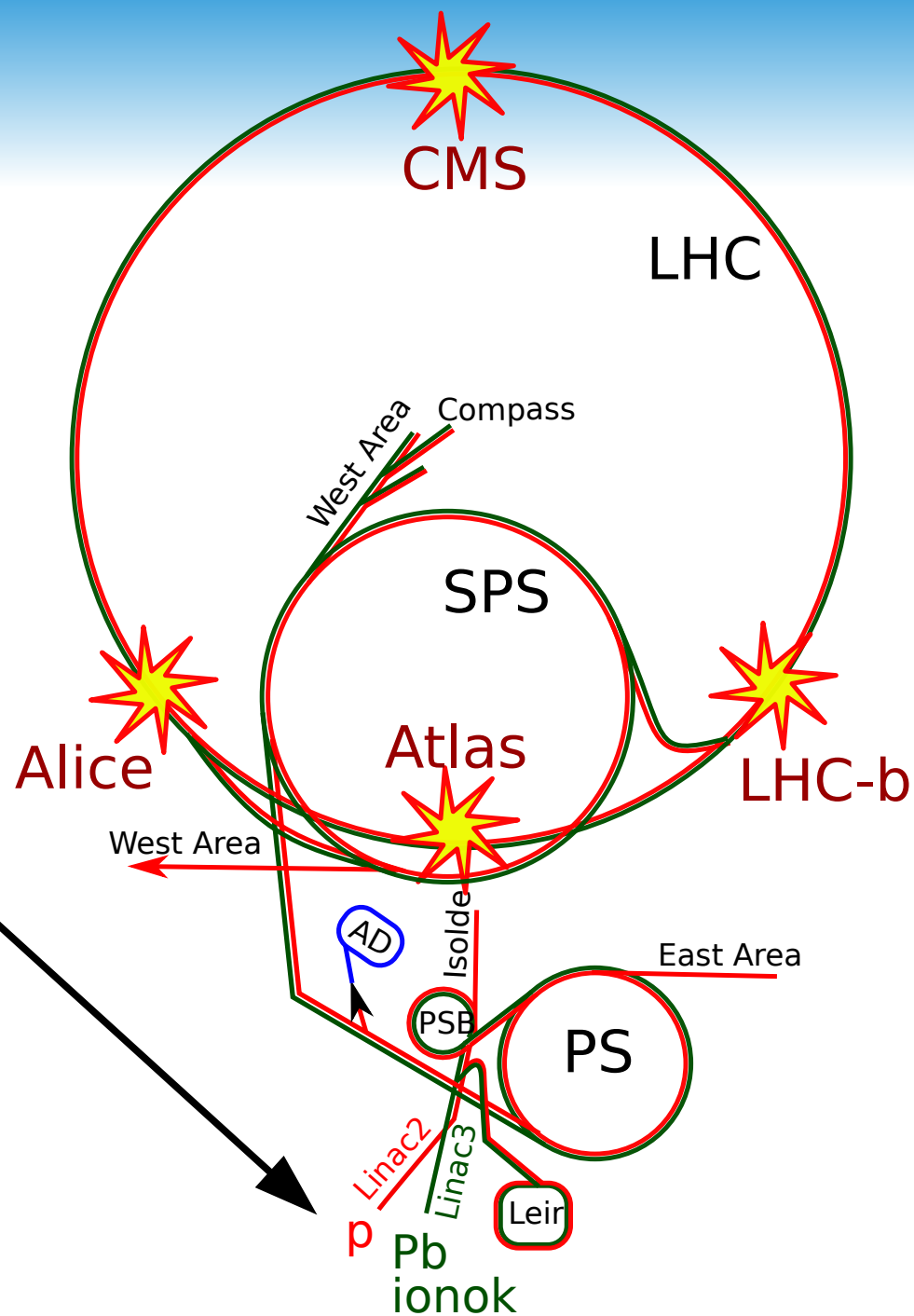
Klasszikus nagyenergiás gyorsítórendszerek és alkotóelemeik

Nagyenergiás gyorsító komplexumok

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



A részecskeforrás



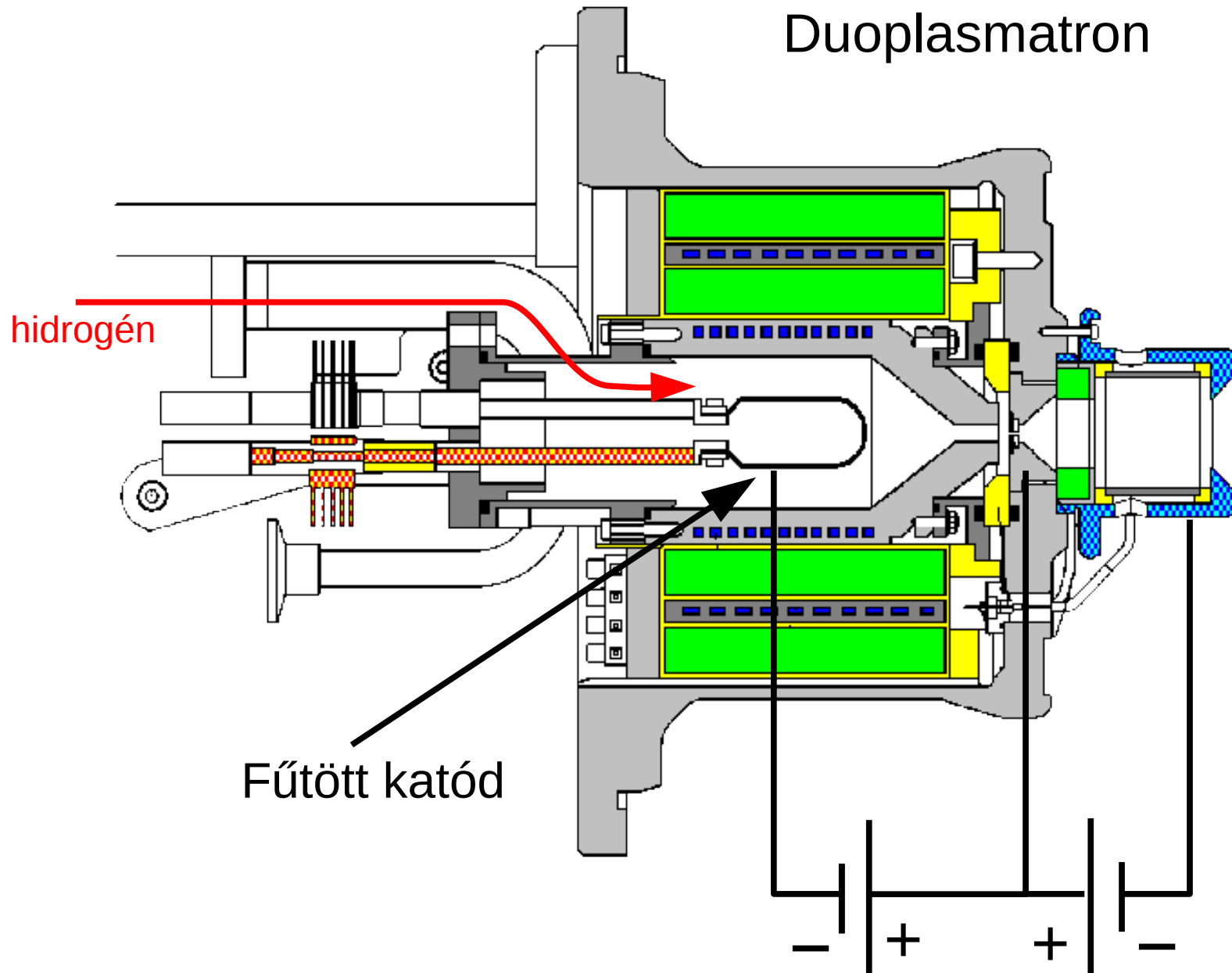
Mennyi hidrogént fogyasztunk?

CERN-LHC:

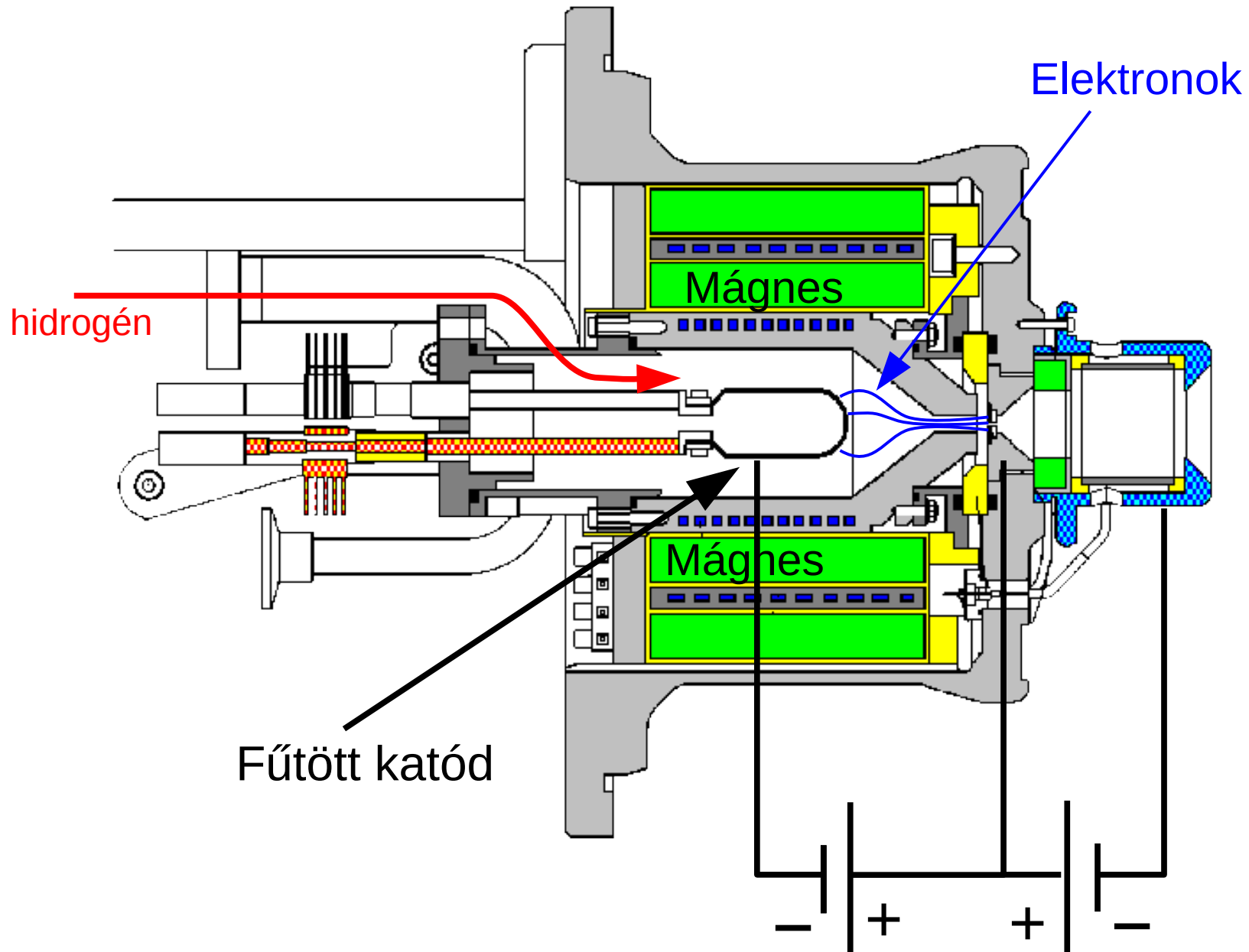
- $\sim 10^{11}$ proton egy csomagban
- 2808 csomag kering egy irányban
- $\sim 5 \times 10^{14}$ proton van egyszerre a gyűrűben
- 10 óránként töltik újra a gyűrűt
- **10^6 év alatt használ el (az LHC) 1 g hidrogént**
- A teljes CERN gyorsítókomplexum (más gyorsítók és kísérletek) összesen kb 50x ennyi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

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

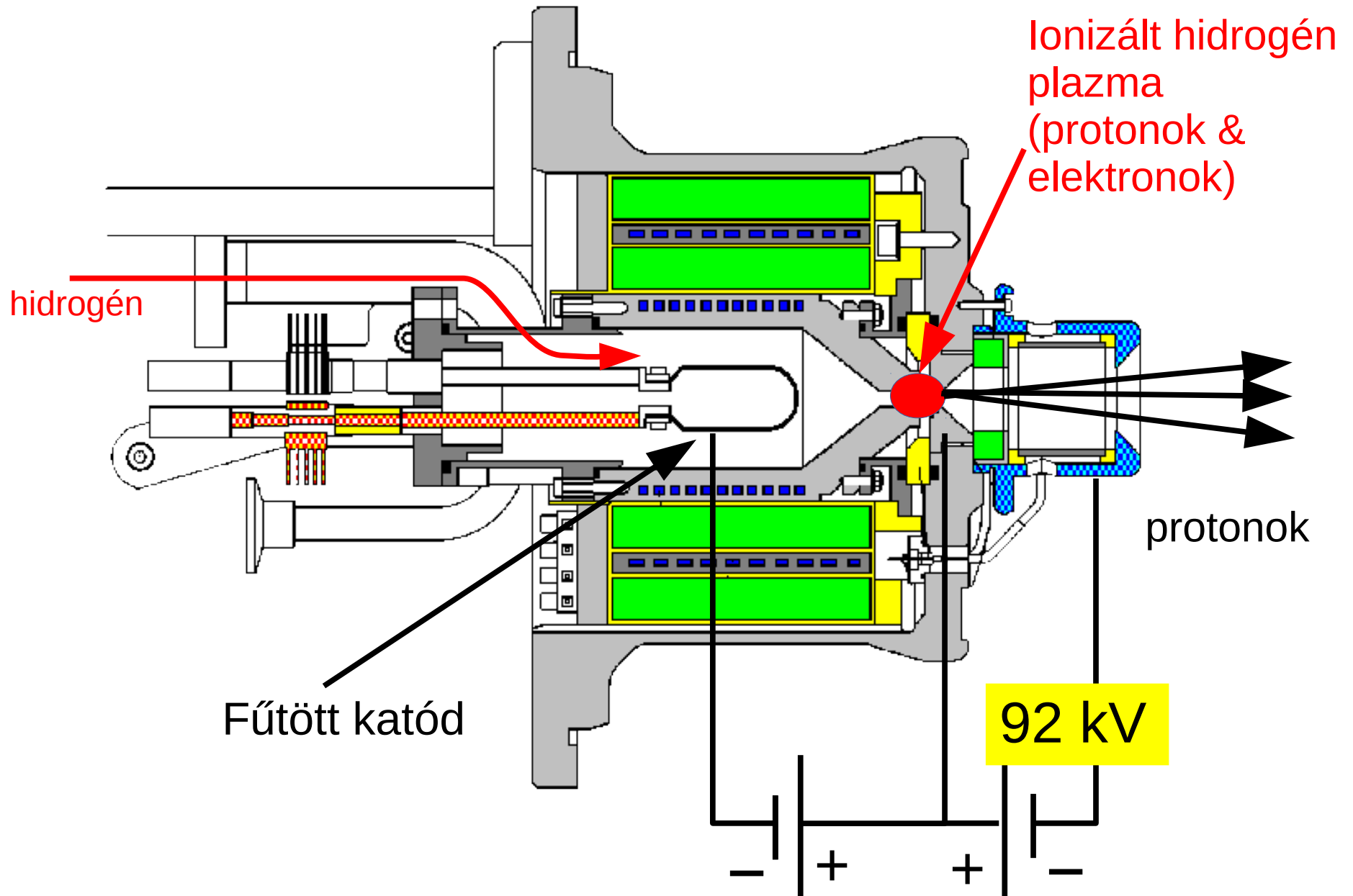
H₂-ből protonok?



H₂-ből protonok?



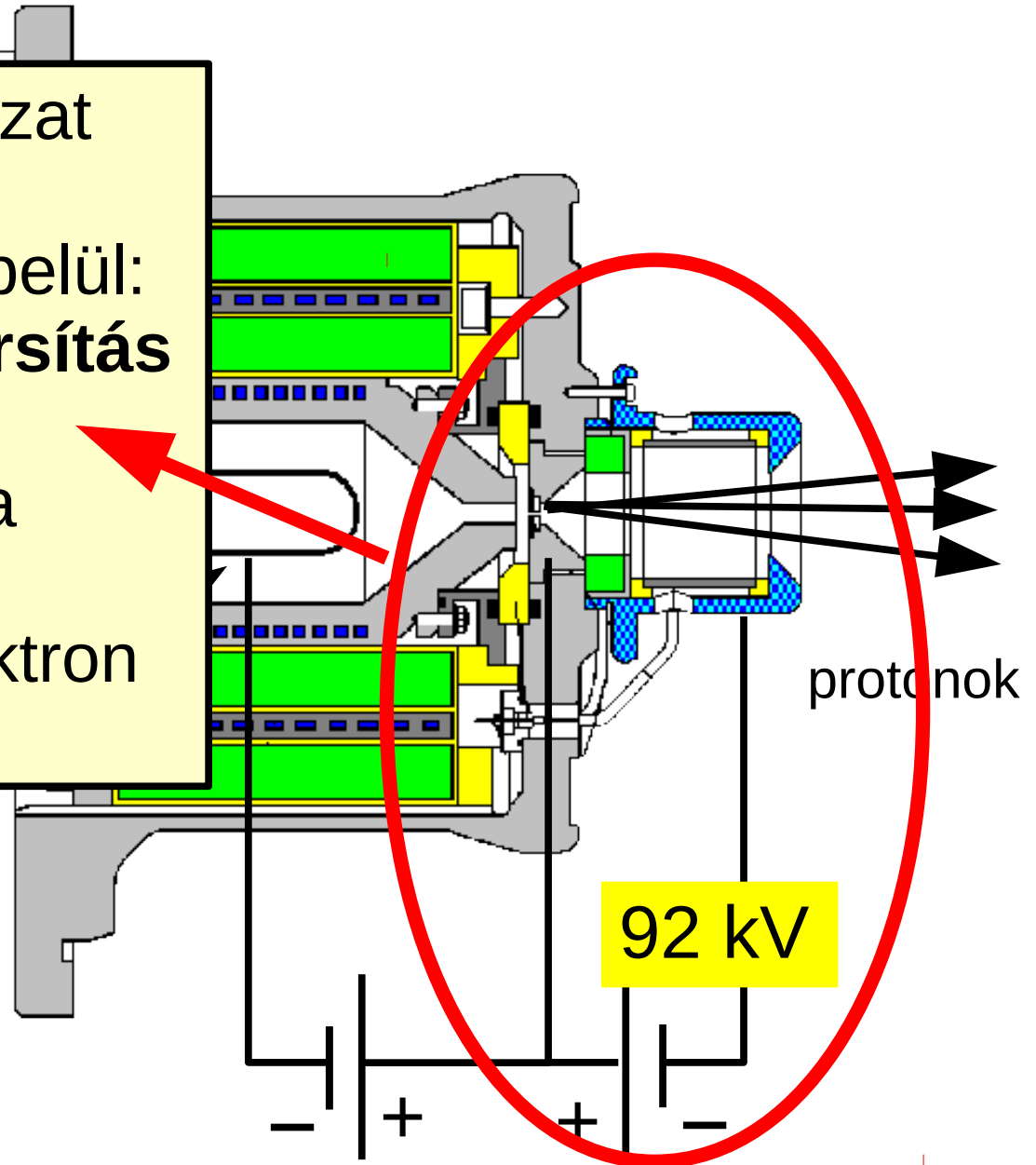
H₂-ből protonok?



H₂-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)

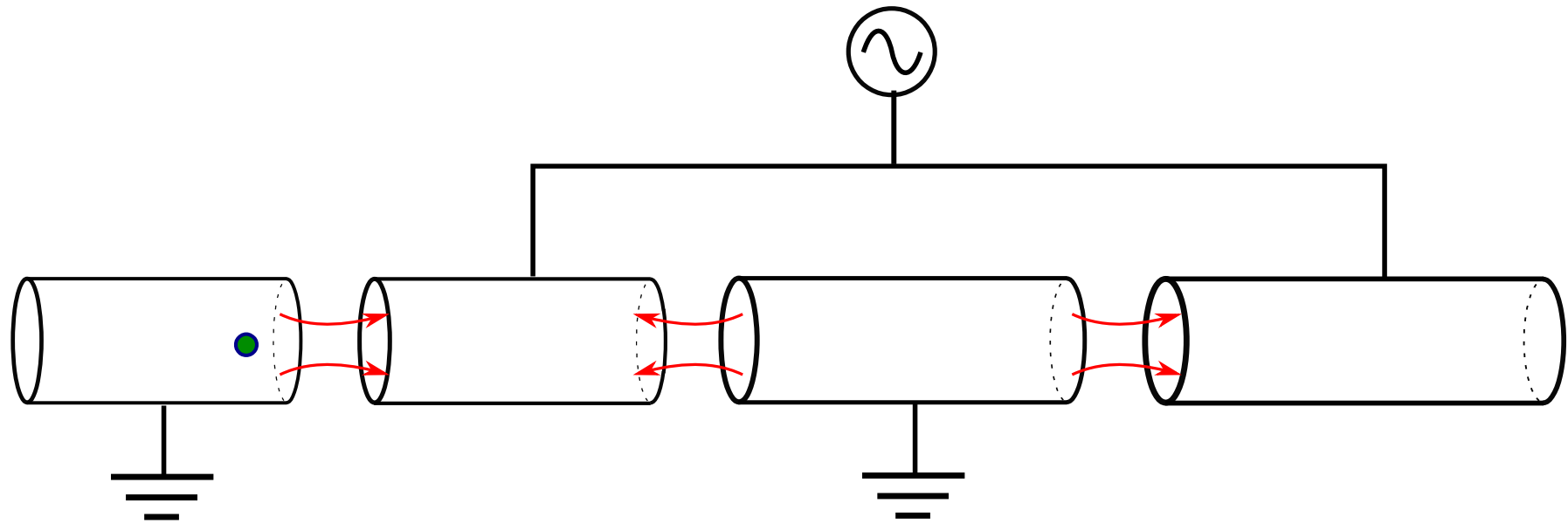


- KFKI Wigner Fizikai Kutatóközpont 5 MeV-es **Van de Graaff** gyorsítója
- Nagy méretek
- Elektromos átütés veszélye (5 millió volt !)
- Nem nagyon lehet ezt az energiát meghaladni
- (A fizika szertár nagyon hatásos eszköze egy Van de Graaff generátor!!!)

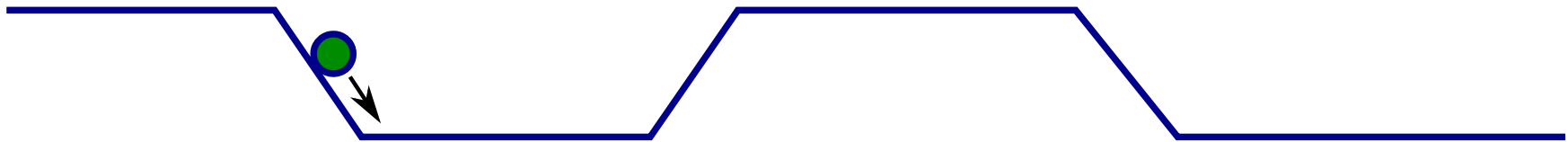
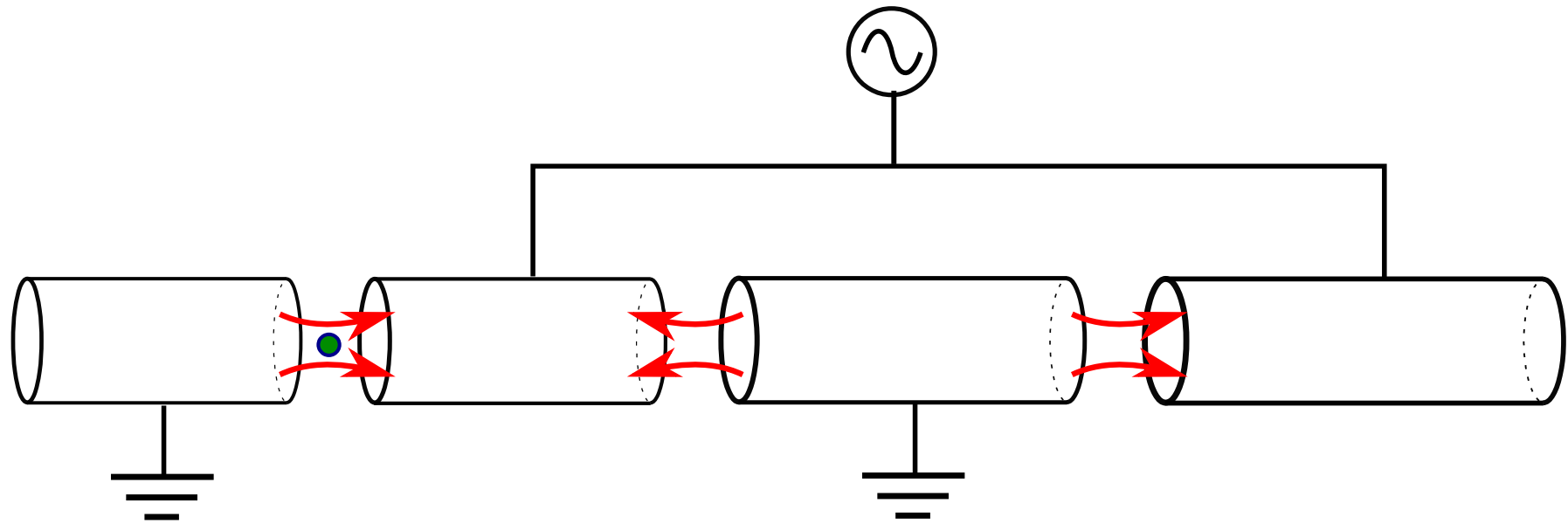
Magasabb energia – hogyan?

- 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!**

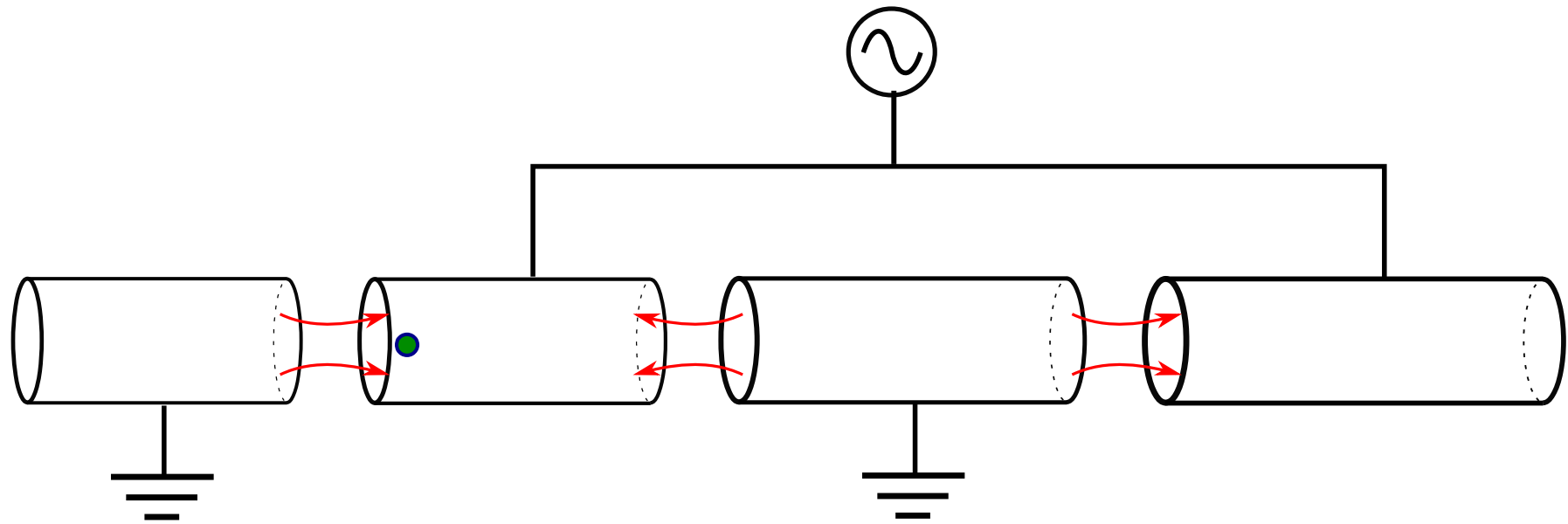
Wideroe linac



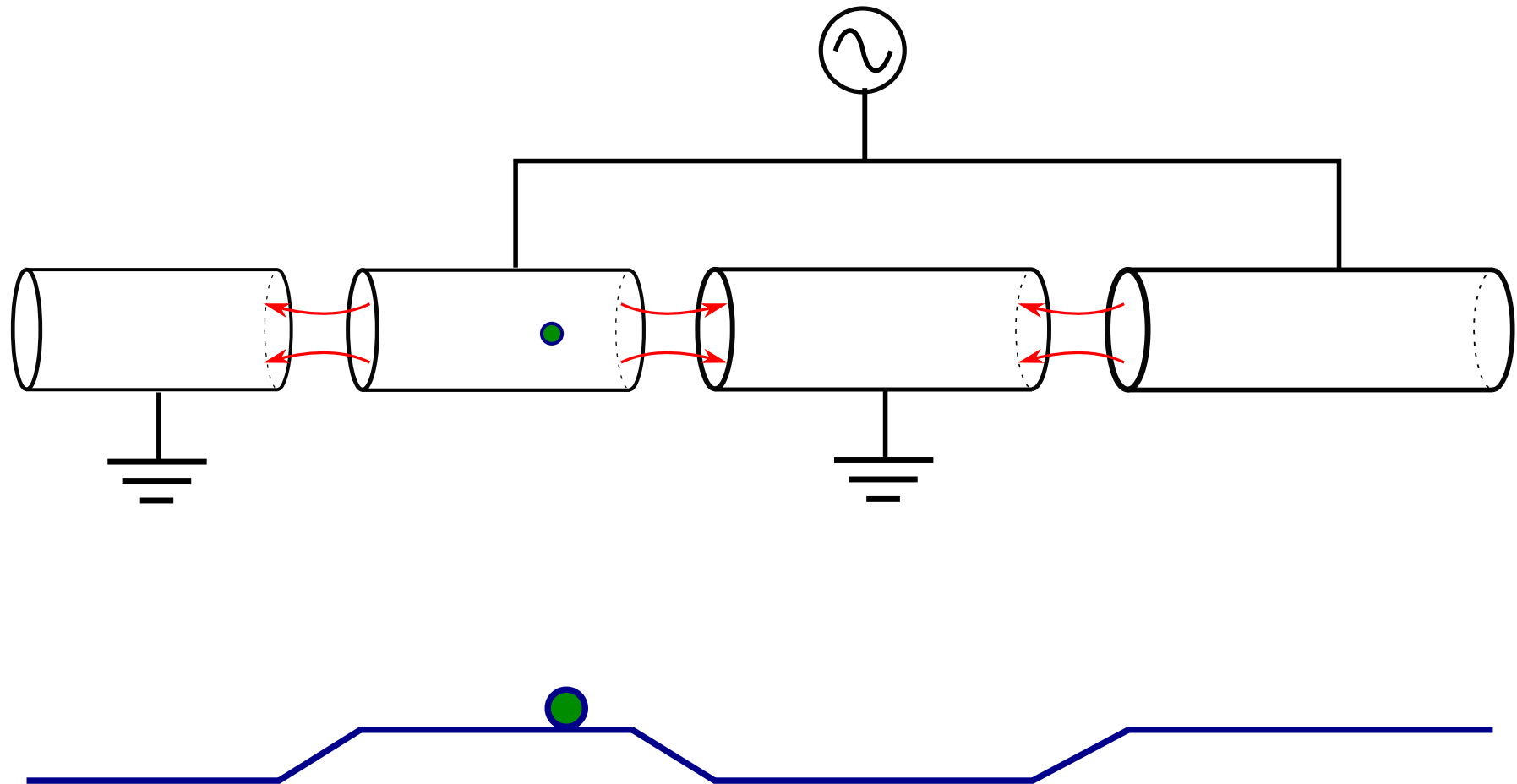
Wideroe linac



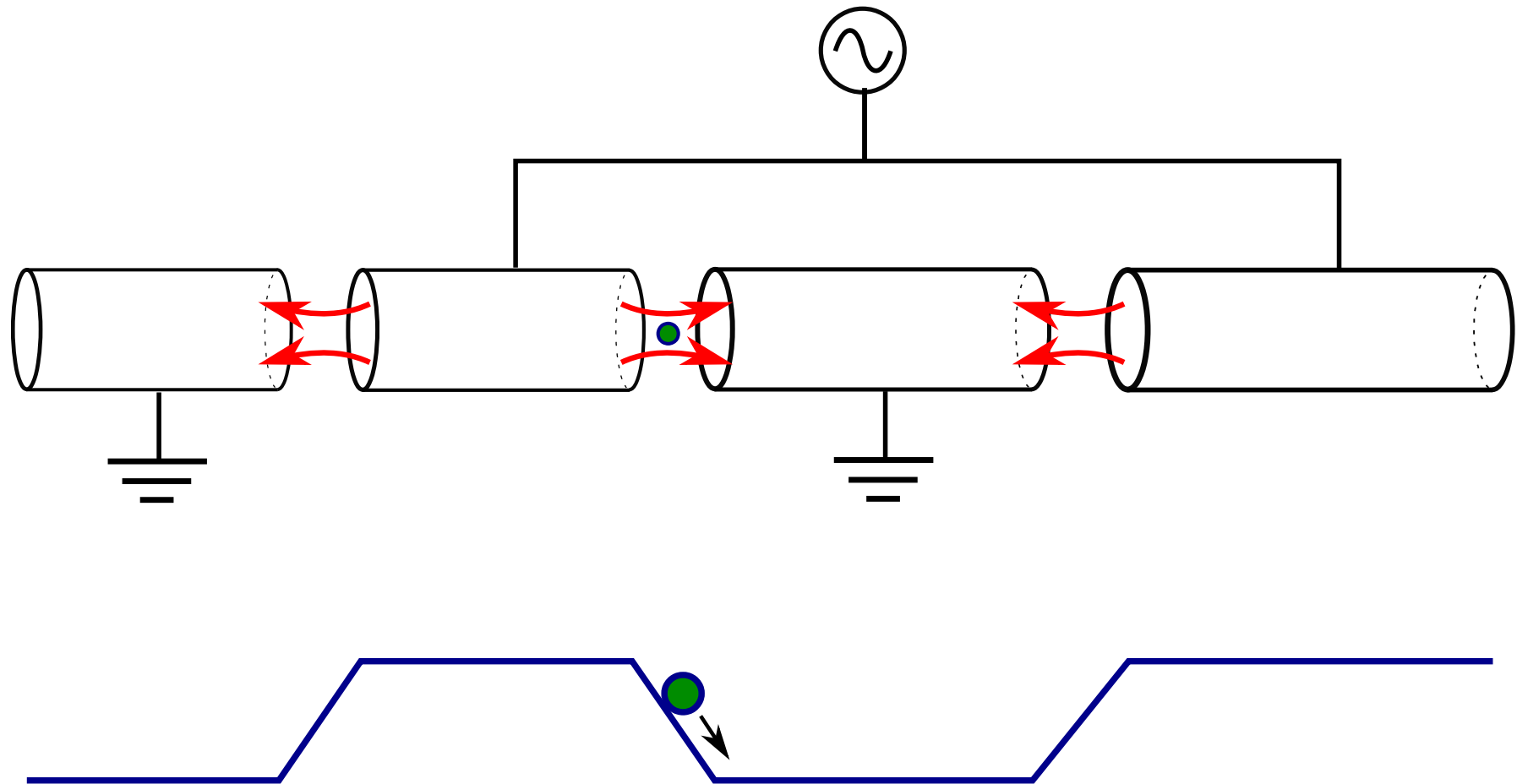
Wideroe linac



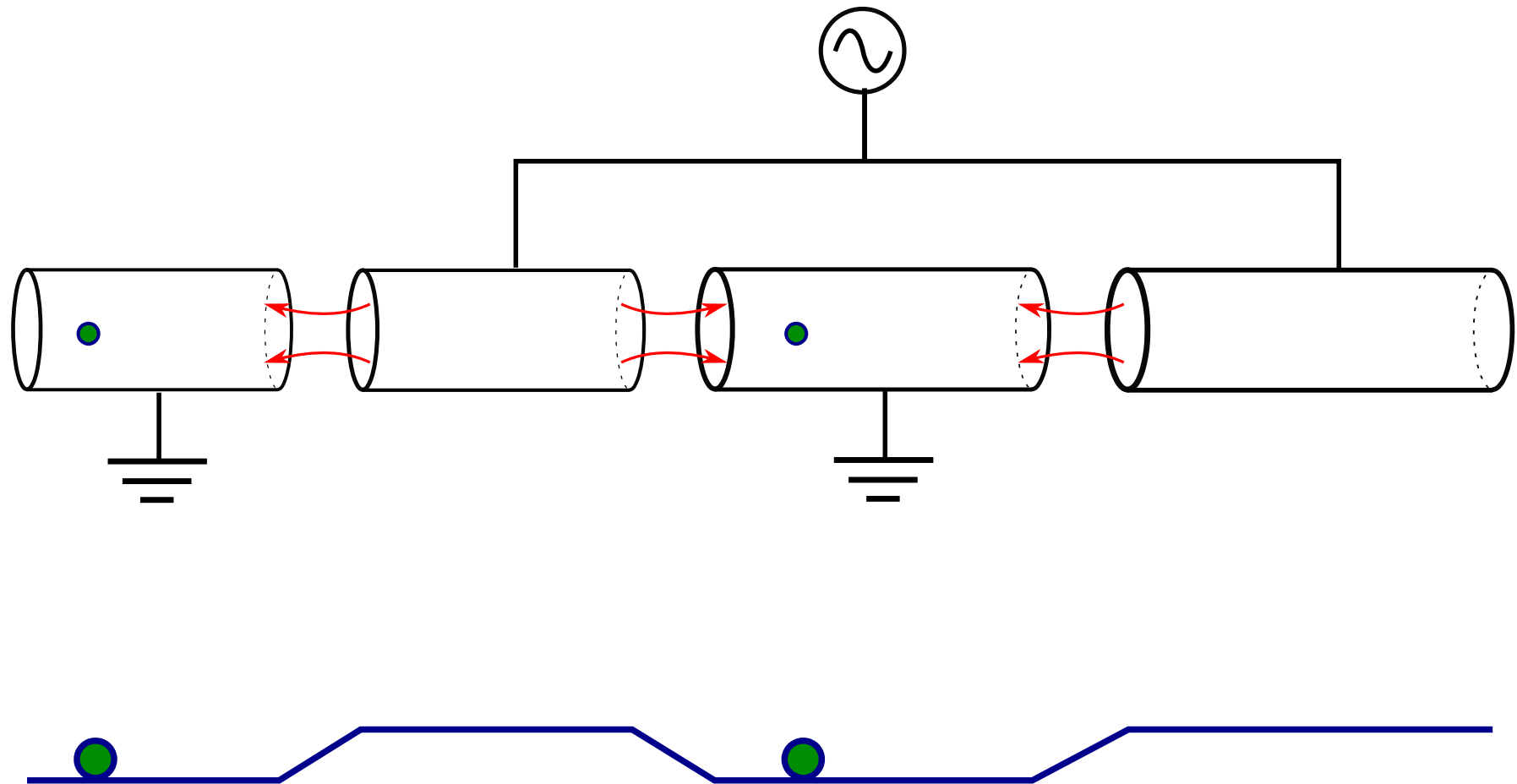
Wideroe linac



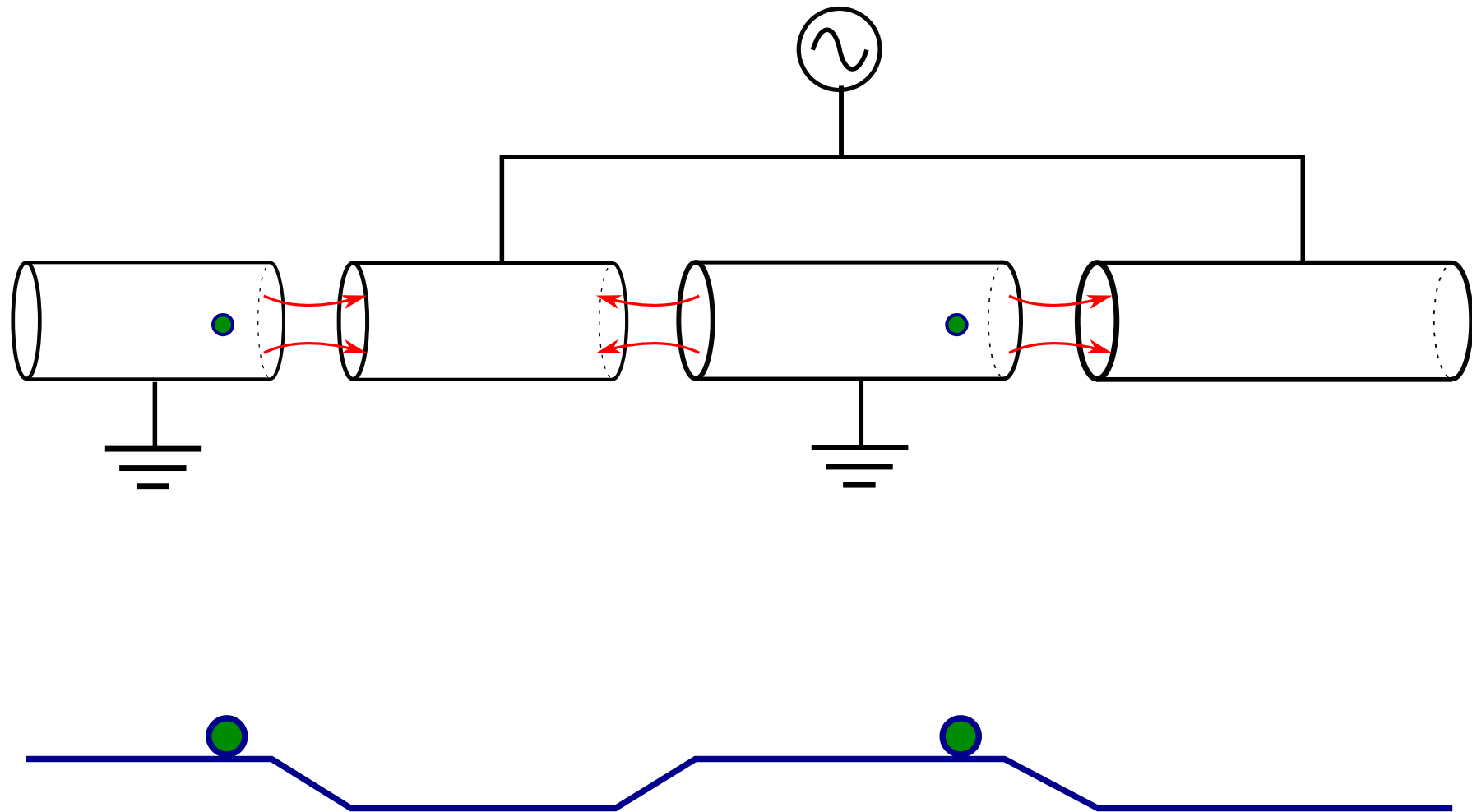
Wideroe linac



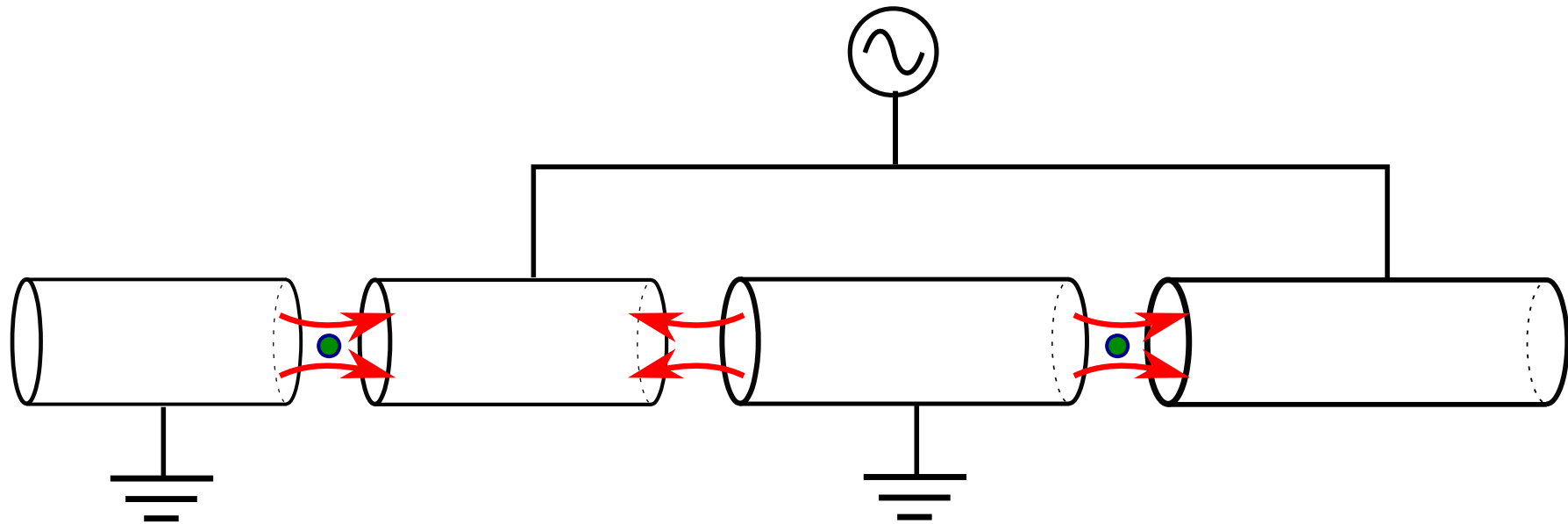
Wideroe linac



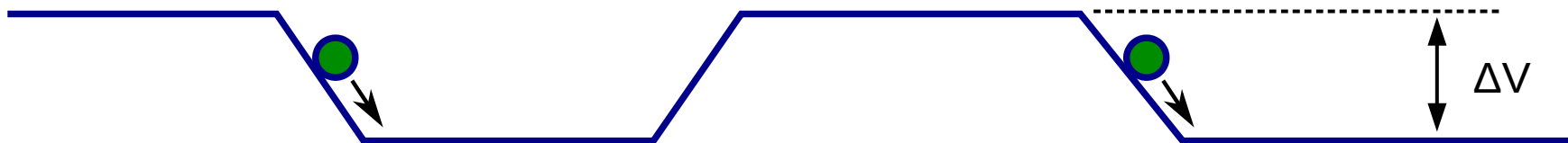
Wideroe linac



Wideroe linac



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



- A komponensek között max. ΔV 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”

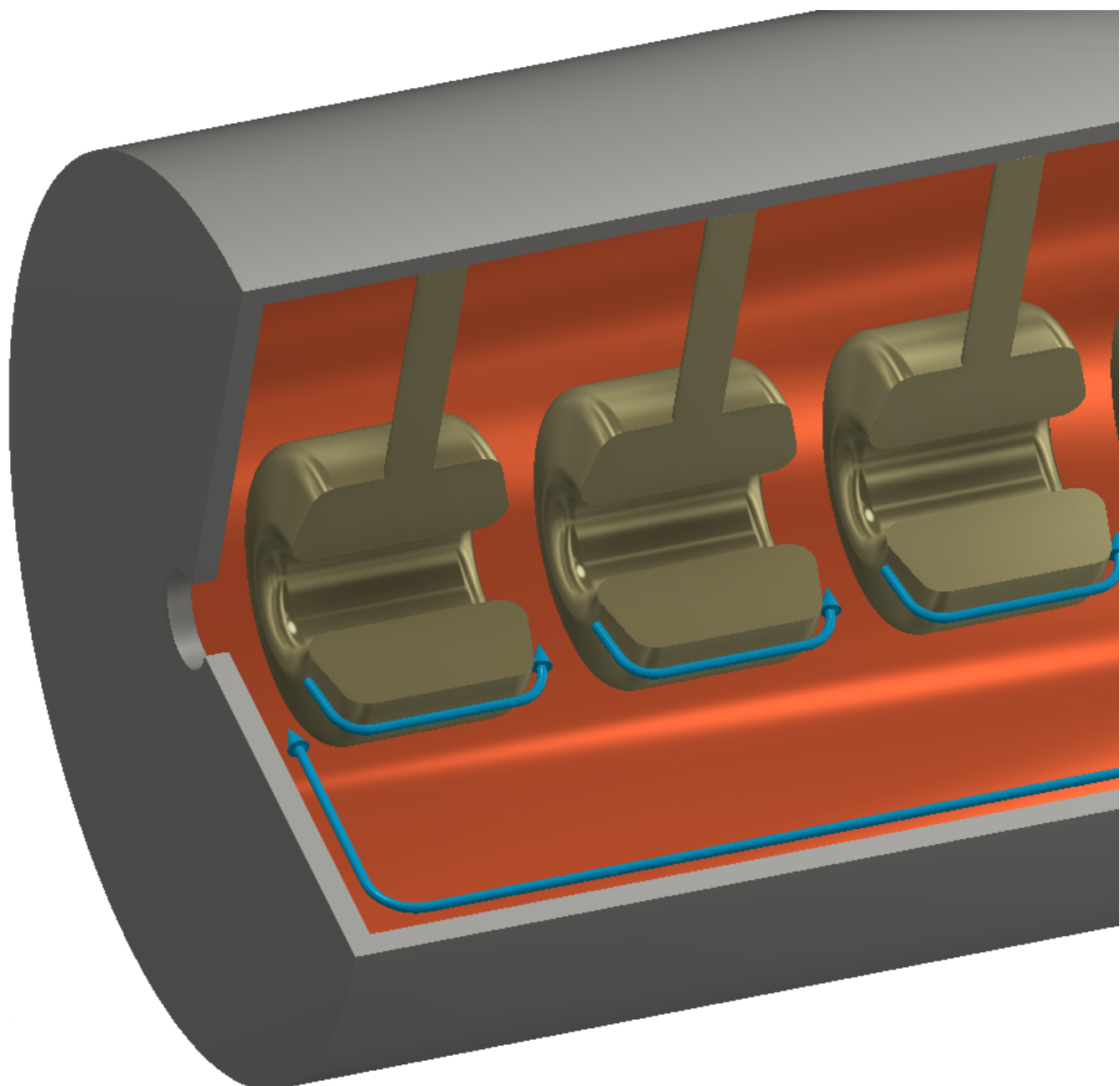
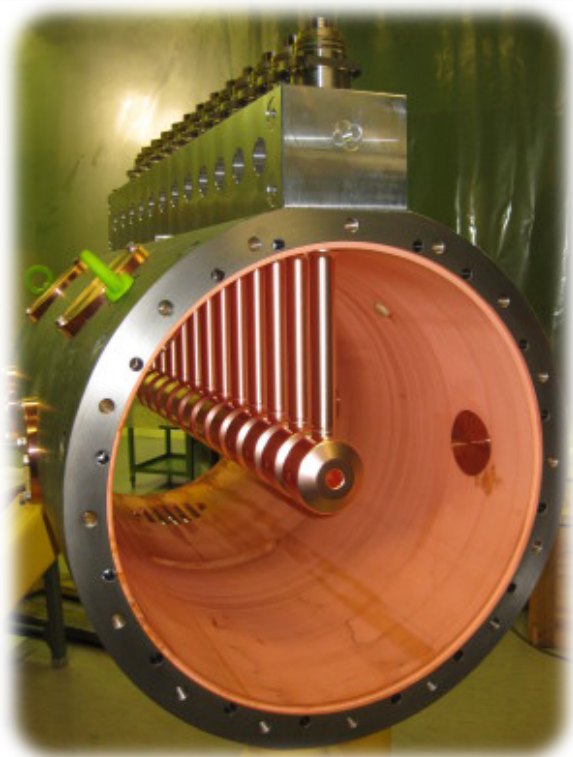


Rezonátor:

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



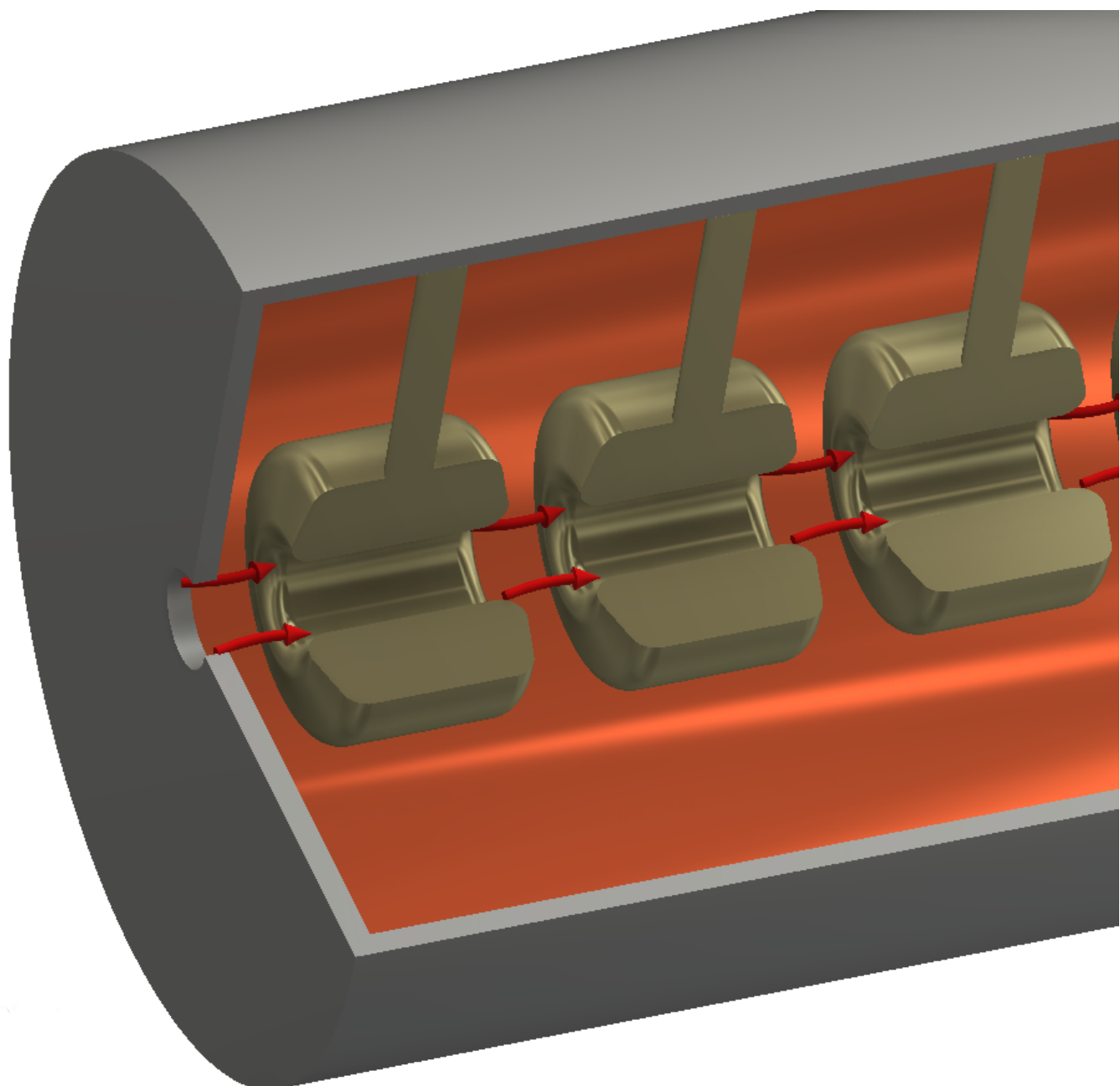
Alvarez (vagy drift tube) linac



Rezonátor:

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

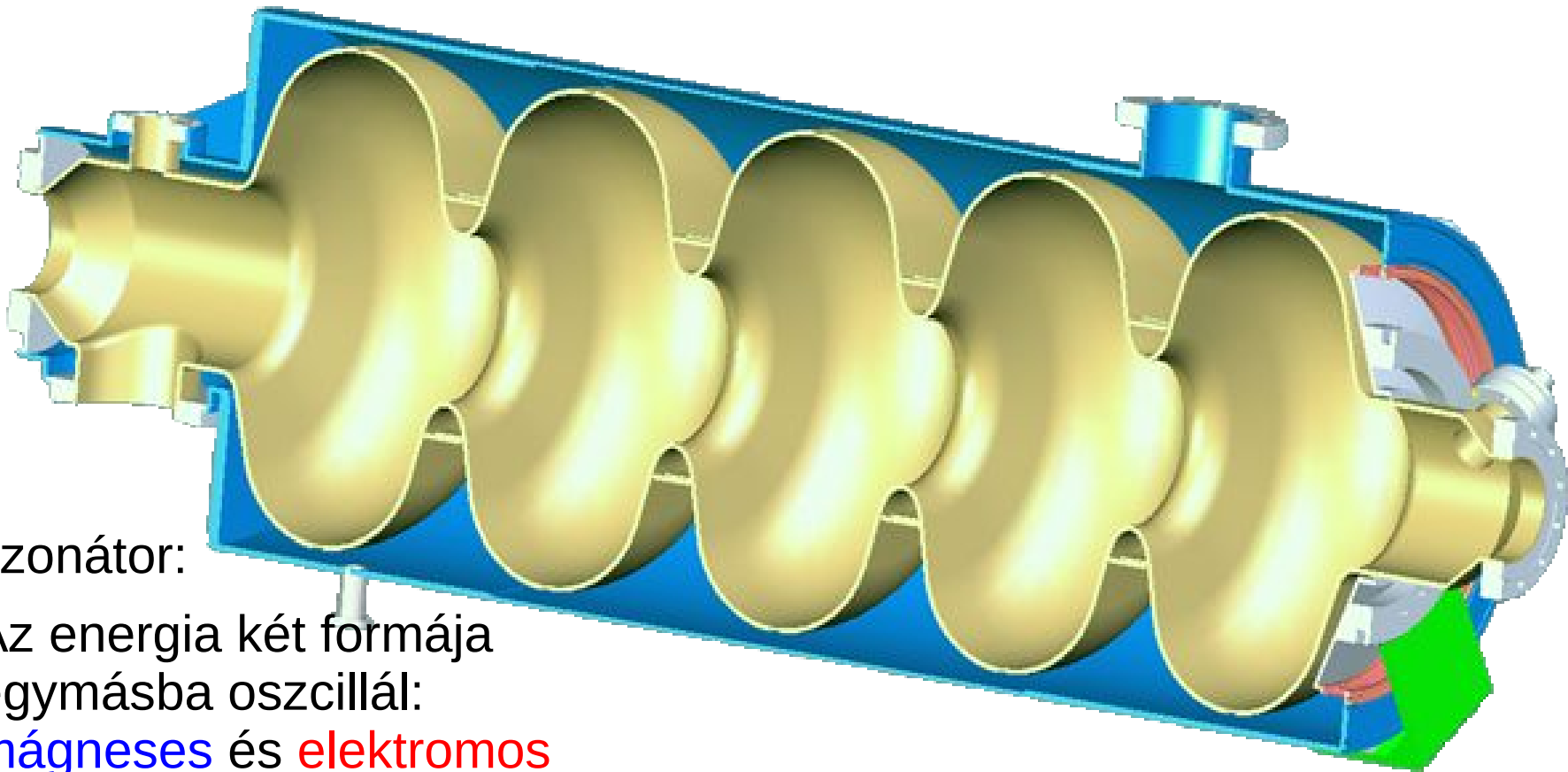
Alvarez (vagy drift tube) linac



Rezonátor:

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

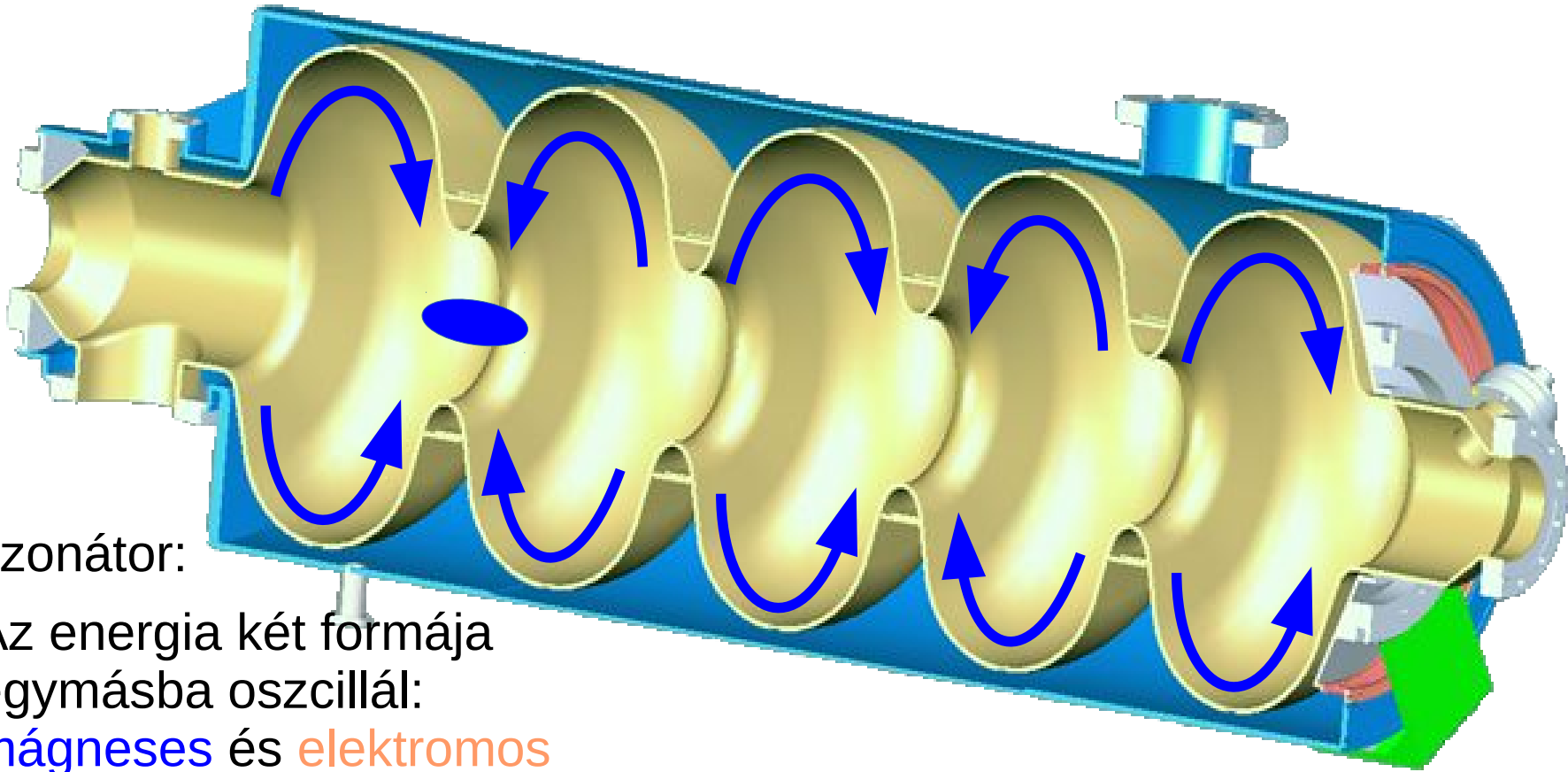
Sokcellás gyorsító rezonátor



Rezonátor:

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

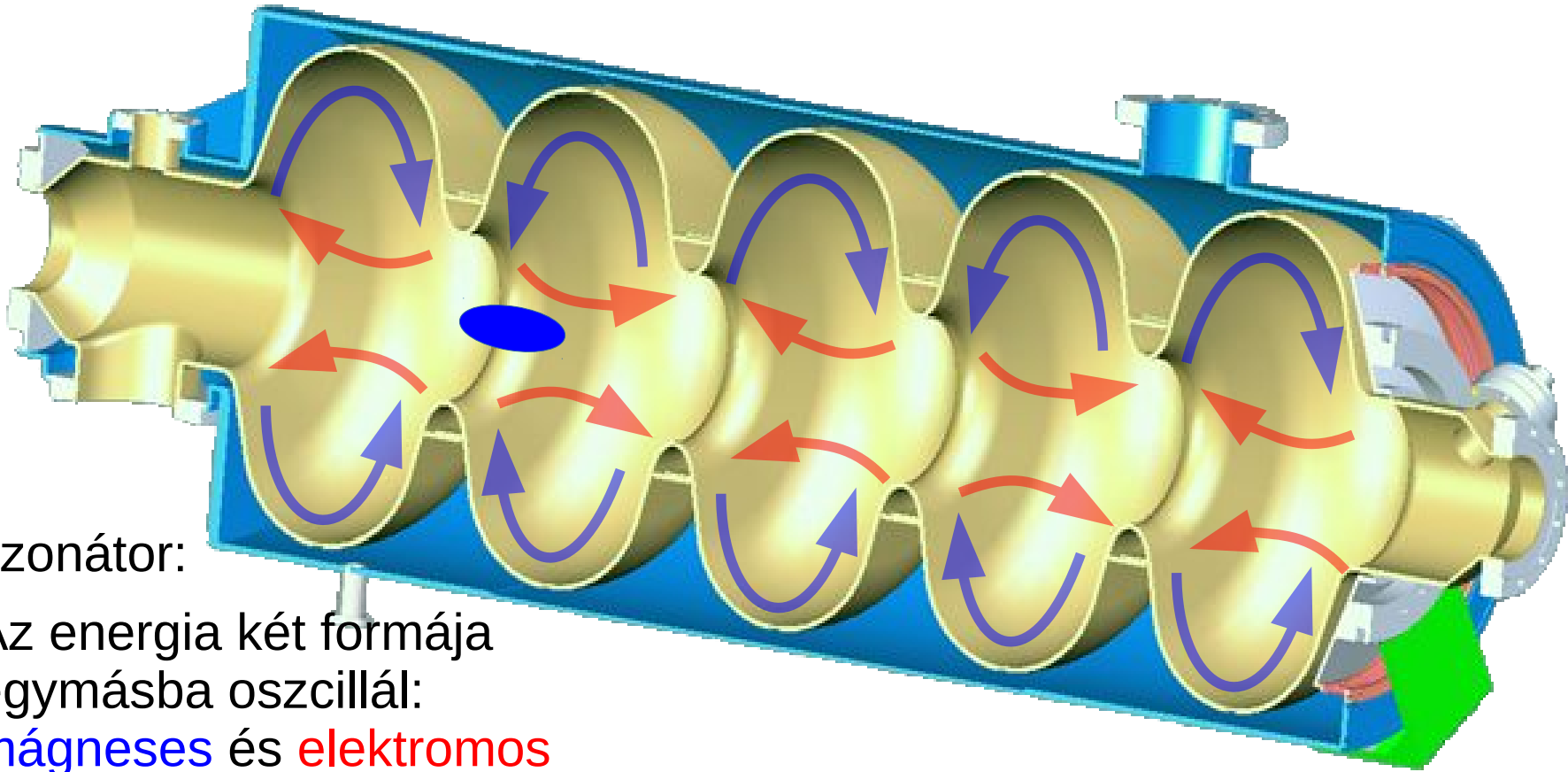
Sokcellás gyorsító rezonátor



Rezonátor:

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

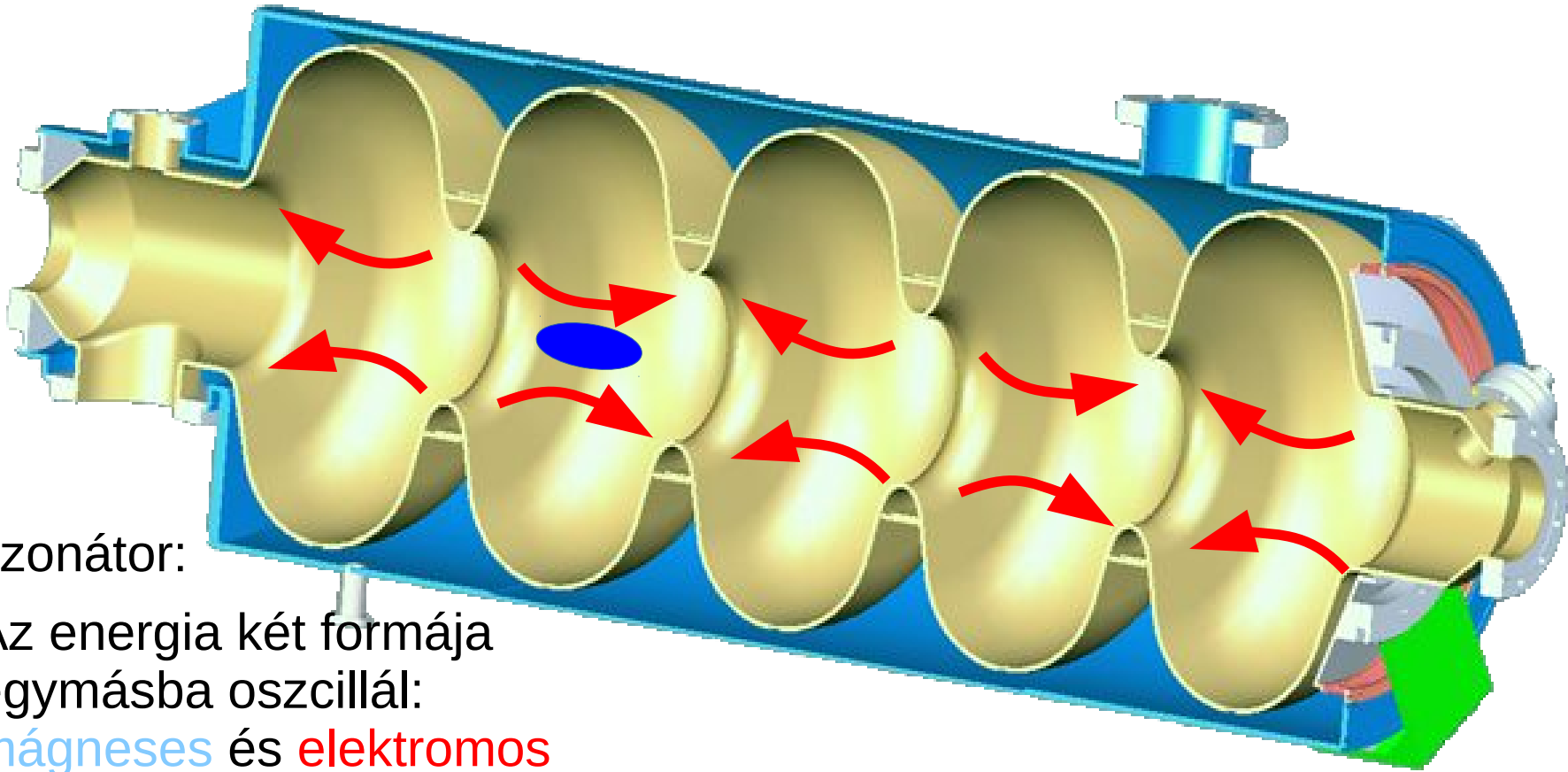
Sokcellás gyorsító rezonátor



Rezonátor:

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

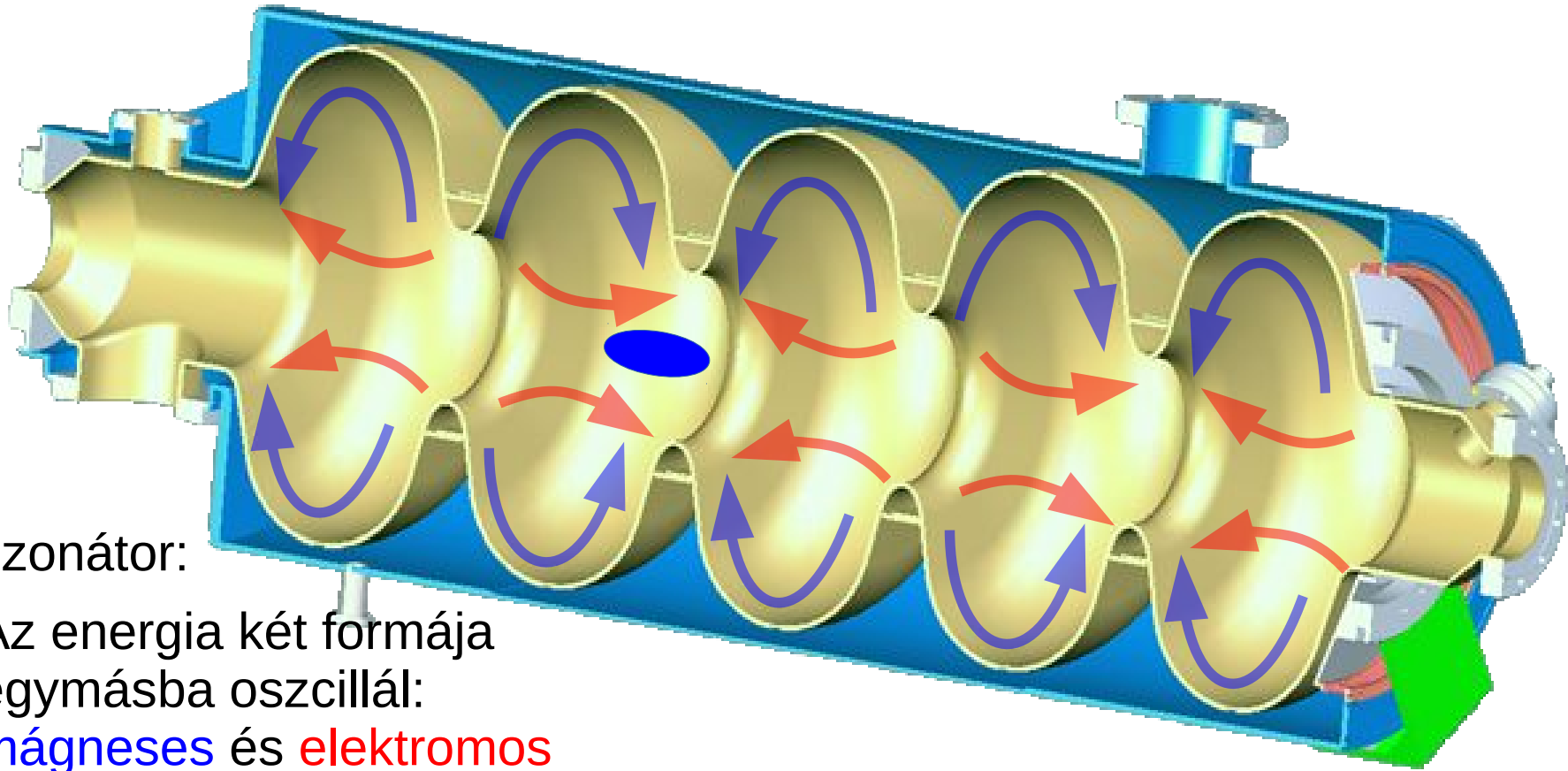
Sokcellás gyorsító rezonátor



Rezonátor:

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

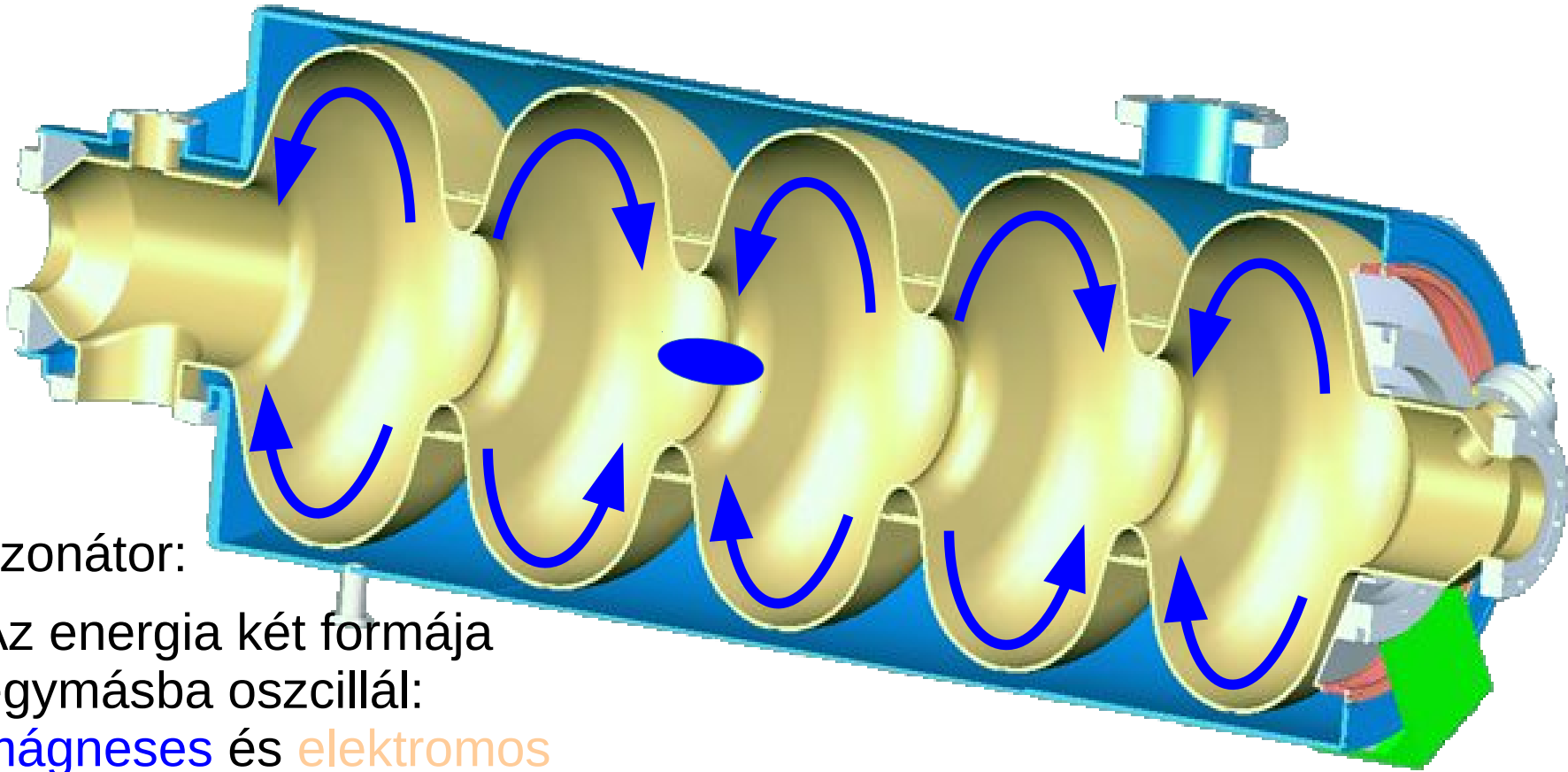
Sokcellás gyorsító rezonátor



Rezonátor:

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

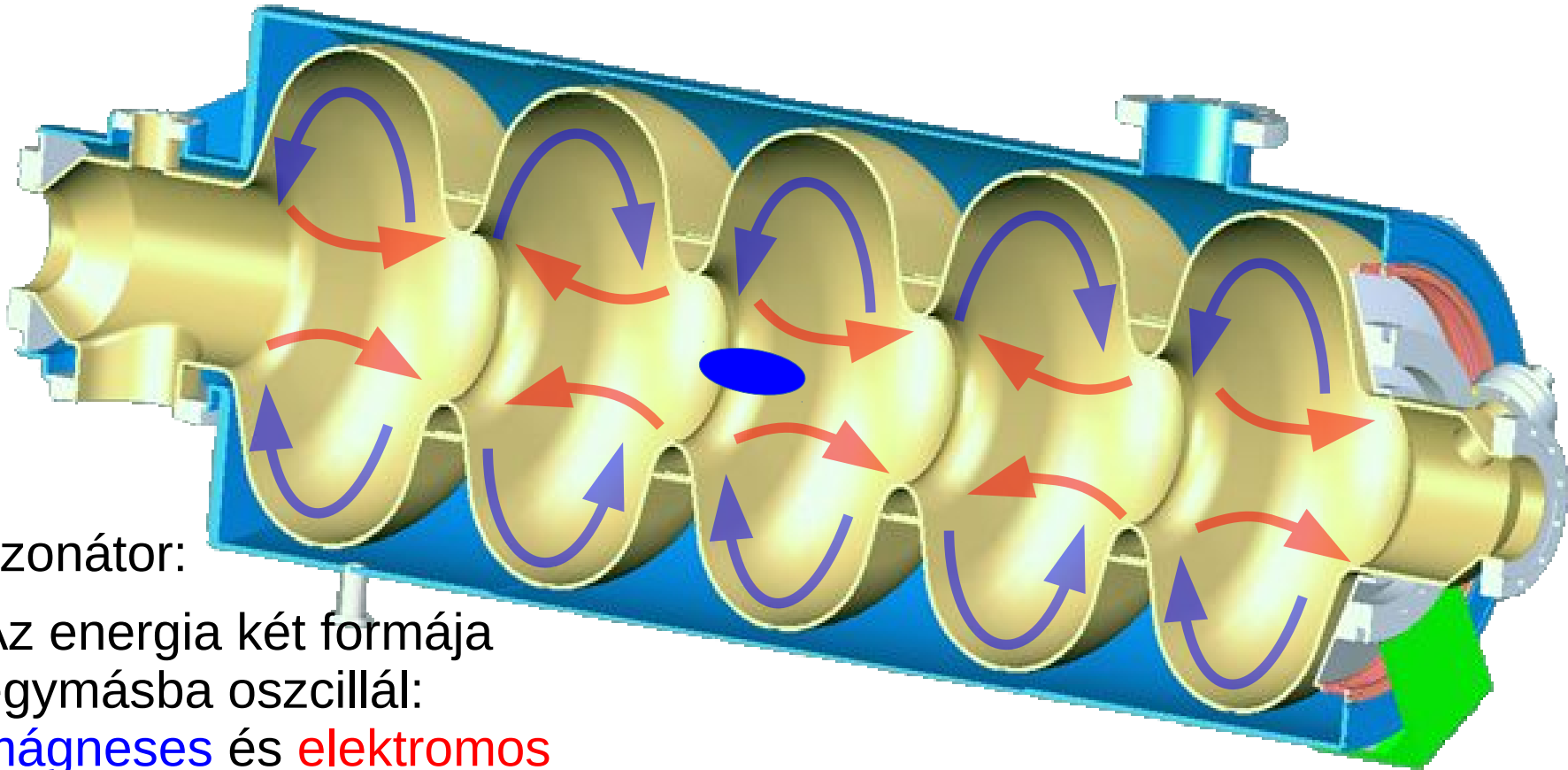
Sokcellás gyorsító rezonátor



Rezonátor:

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

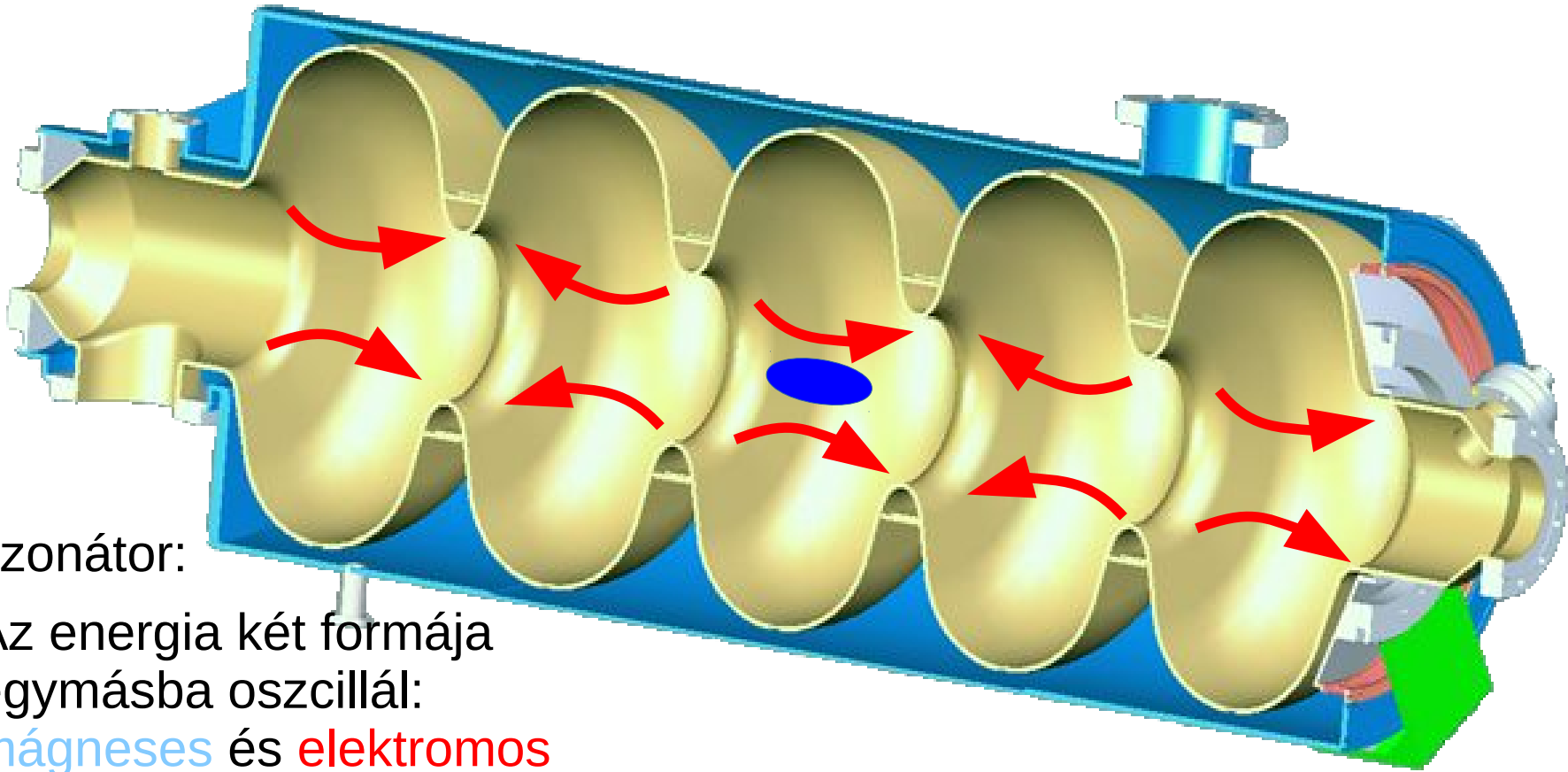
Sokcellás gyorsító rezonátor



Rezonátor:

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

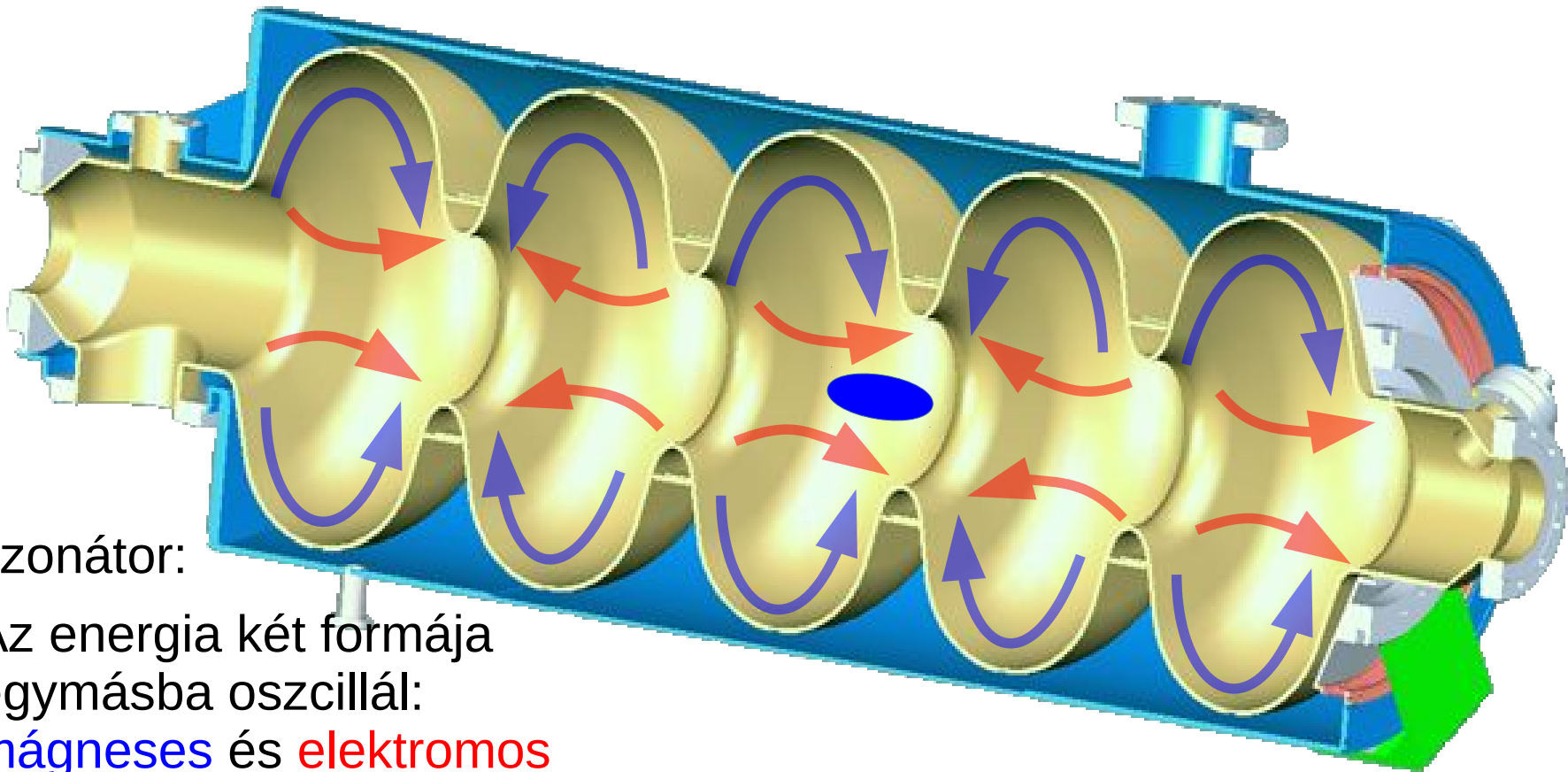
Sokcellás gyorsító rezonátor



Rezonátor:

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

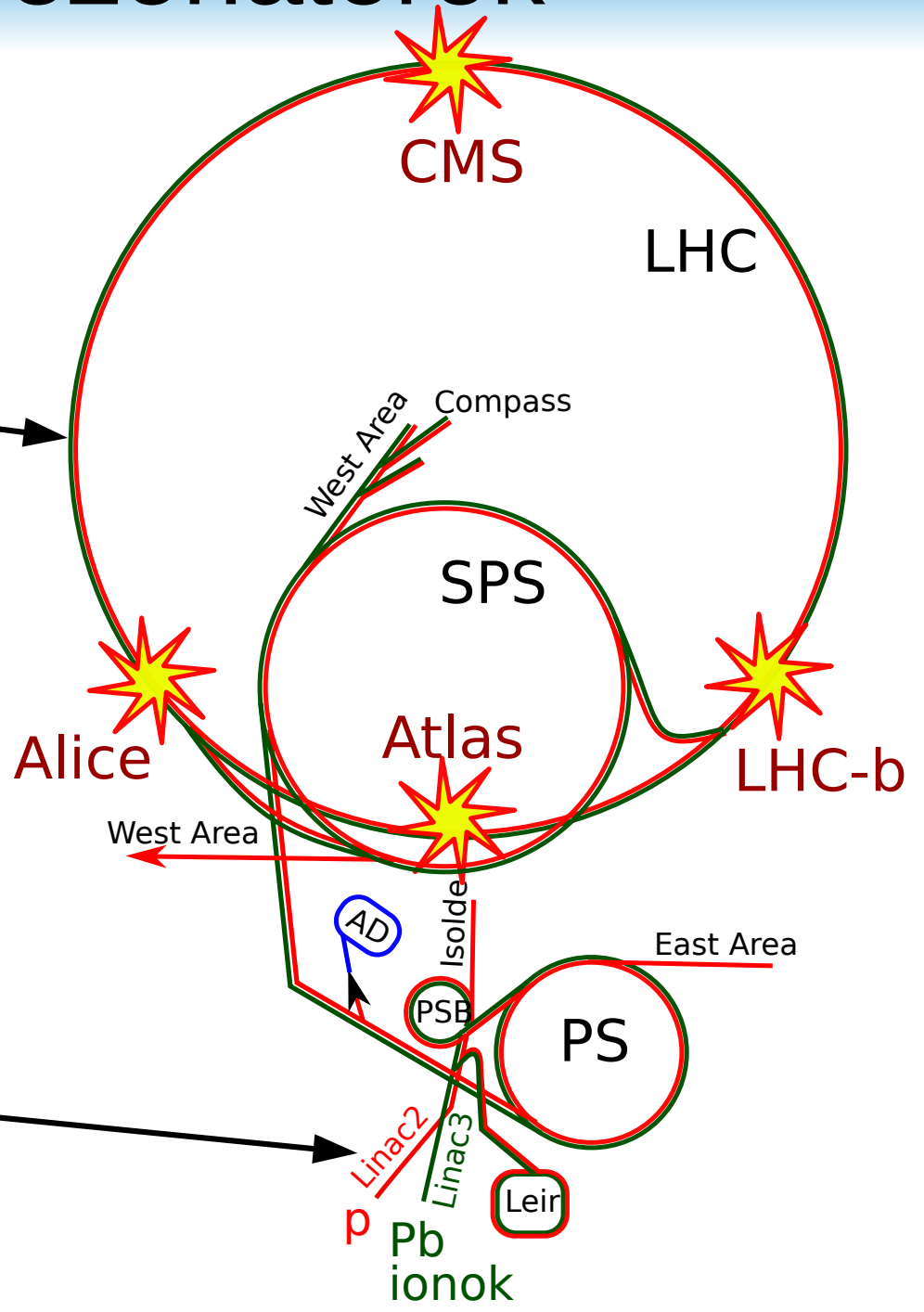
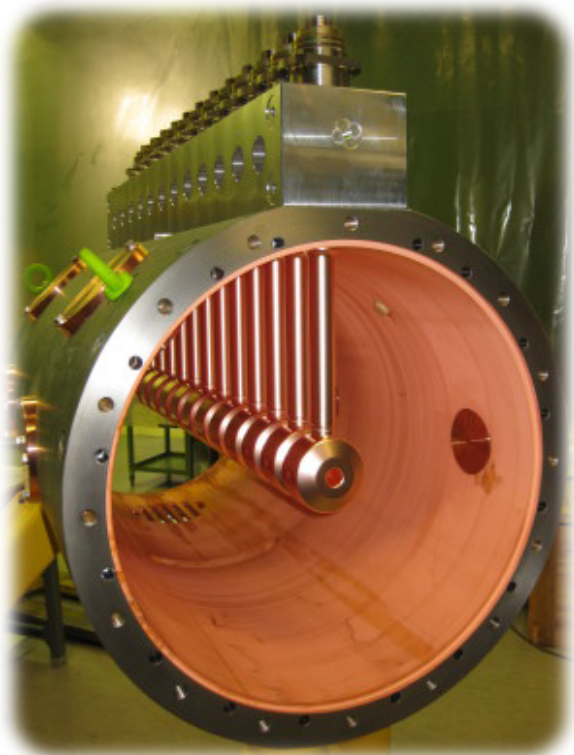
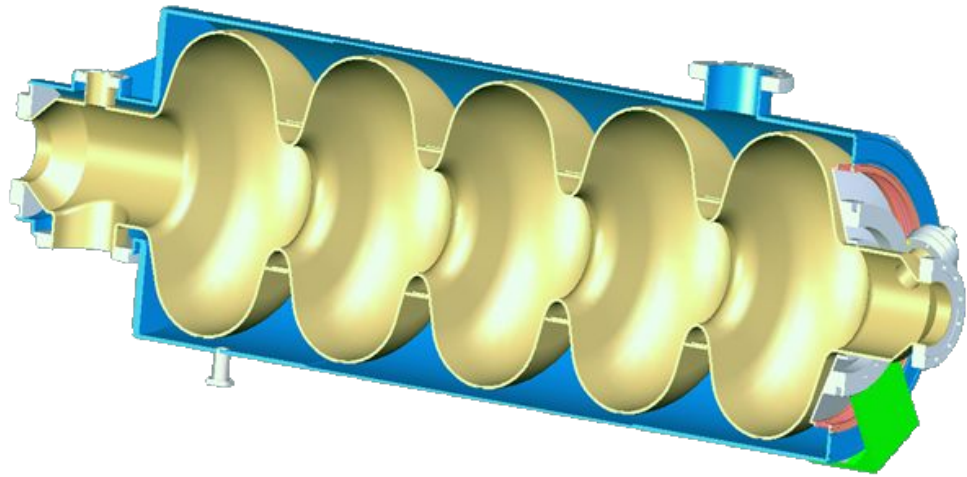
Sokcellás gyorsító rezonátor



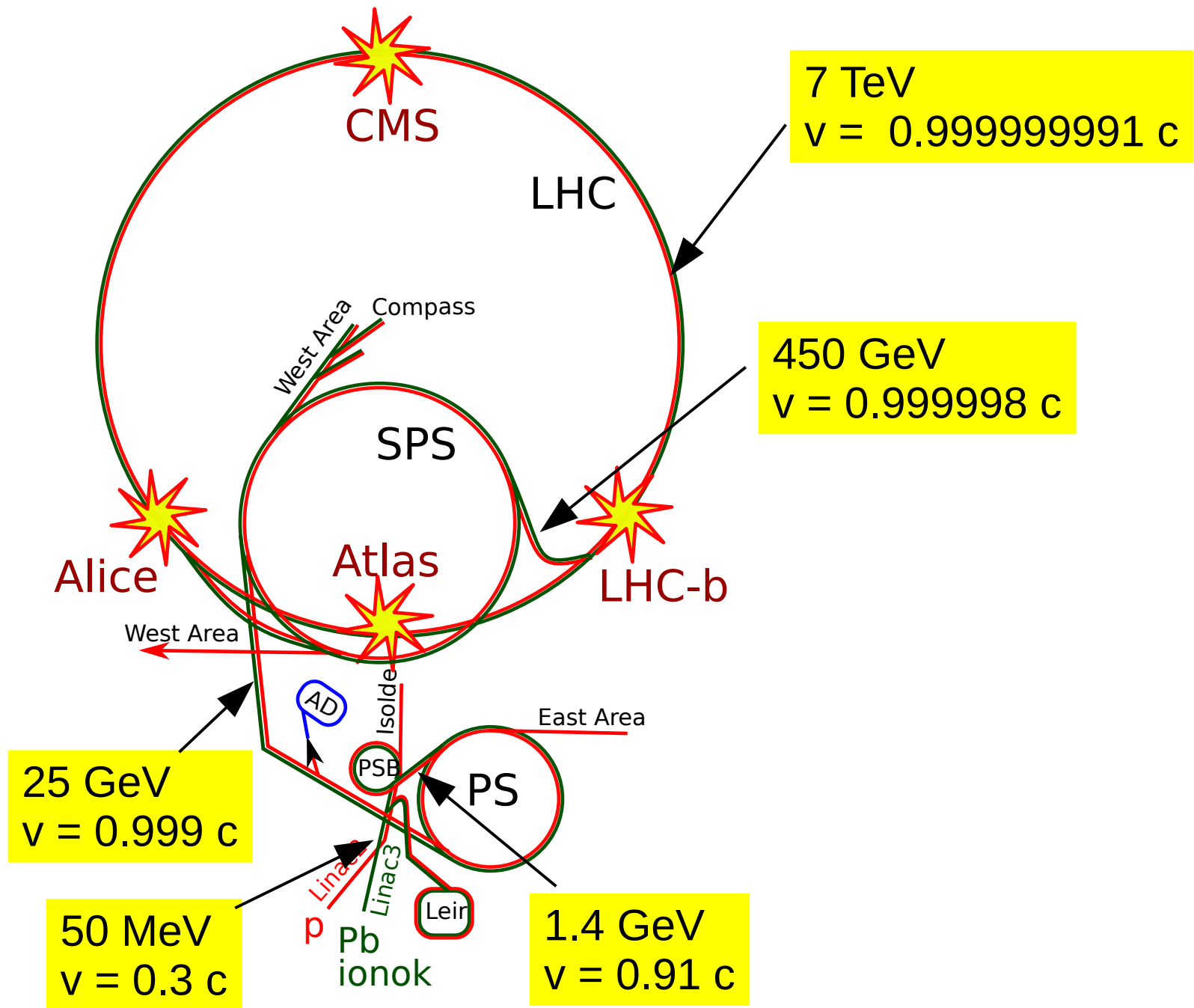
Rezonátor:

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

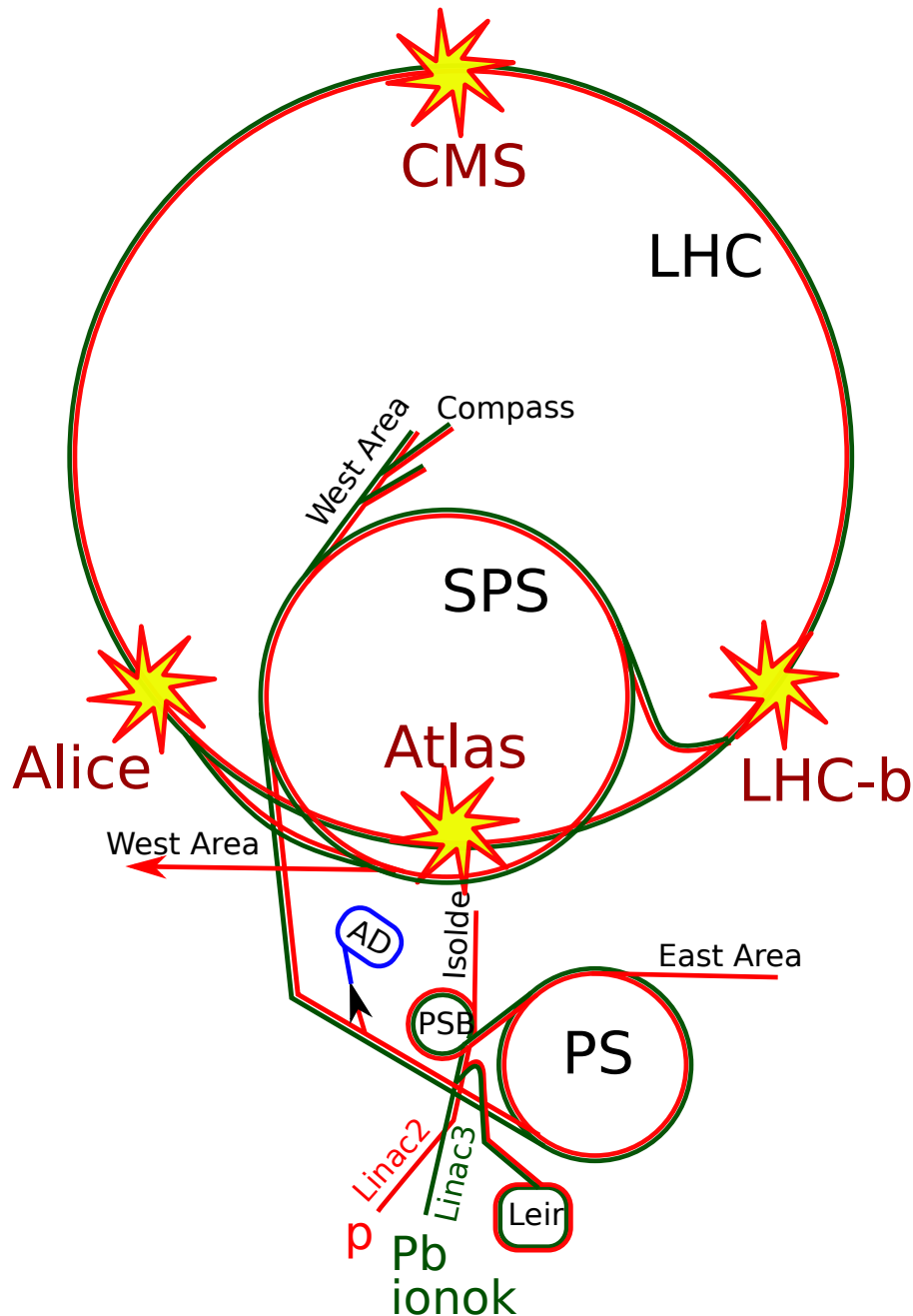
A gyorsító rezonátorok



A gyűrű gyorsítószakasz(ok)



A gyűrű gyorsítószakasz(ok)



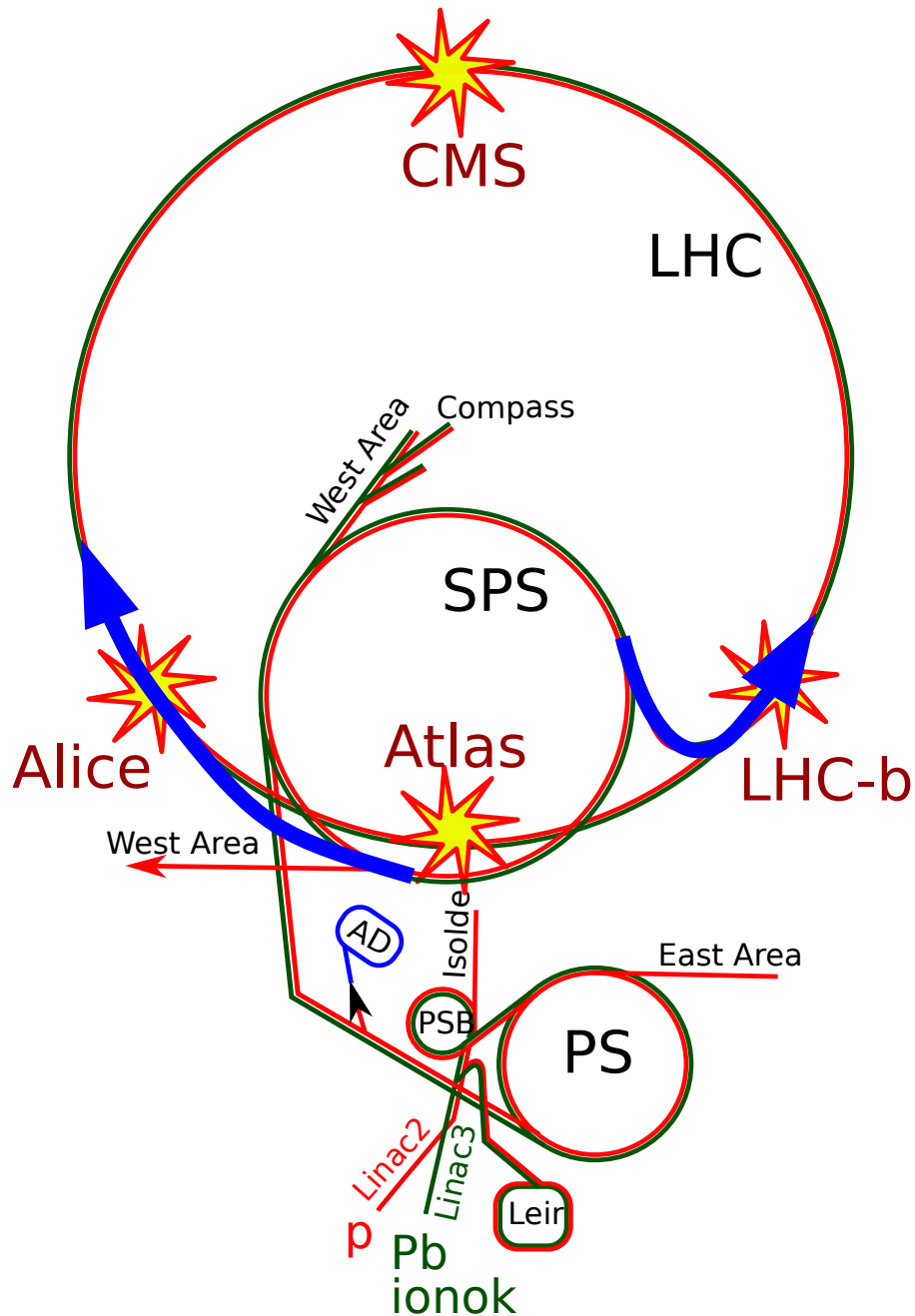
Miért gyűrű?

- 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?

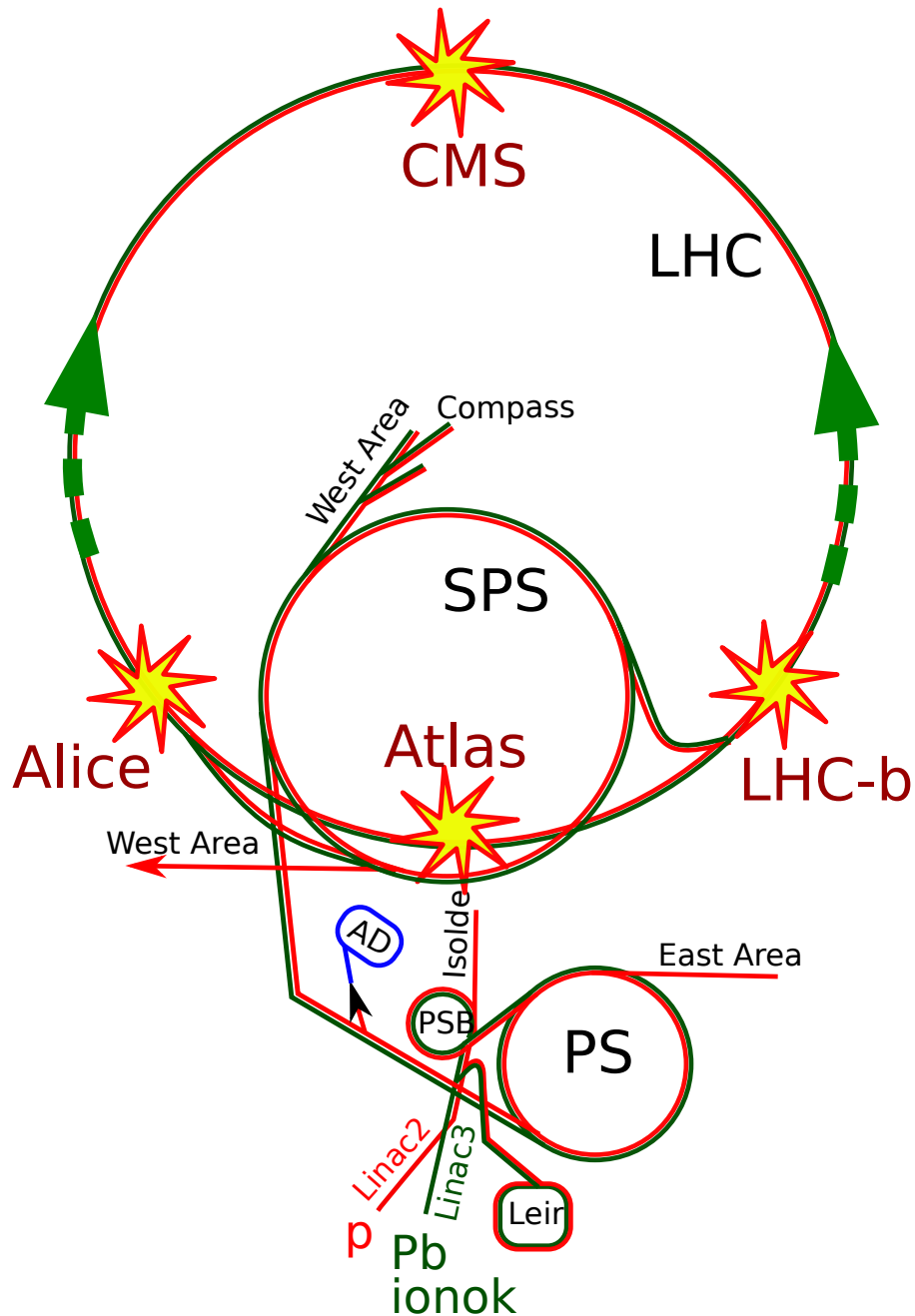
- Egy gyűrű kb. 1 nagyságrendet tud növelni az energián
- Egyre nagyobb gyűrűk

LHC működési ciklusa



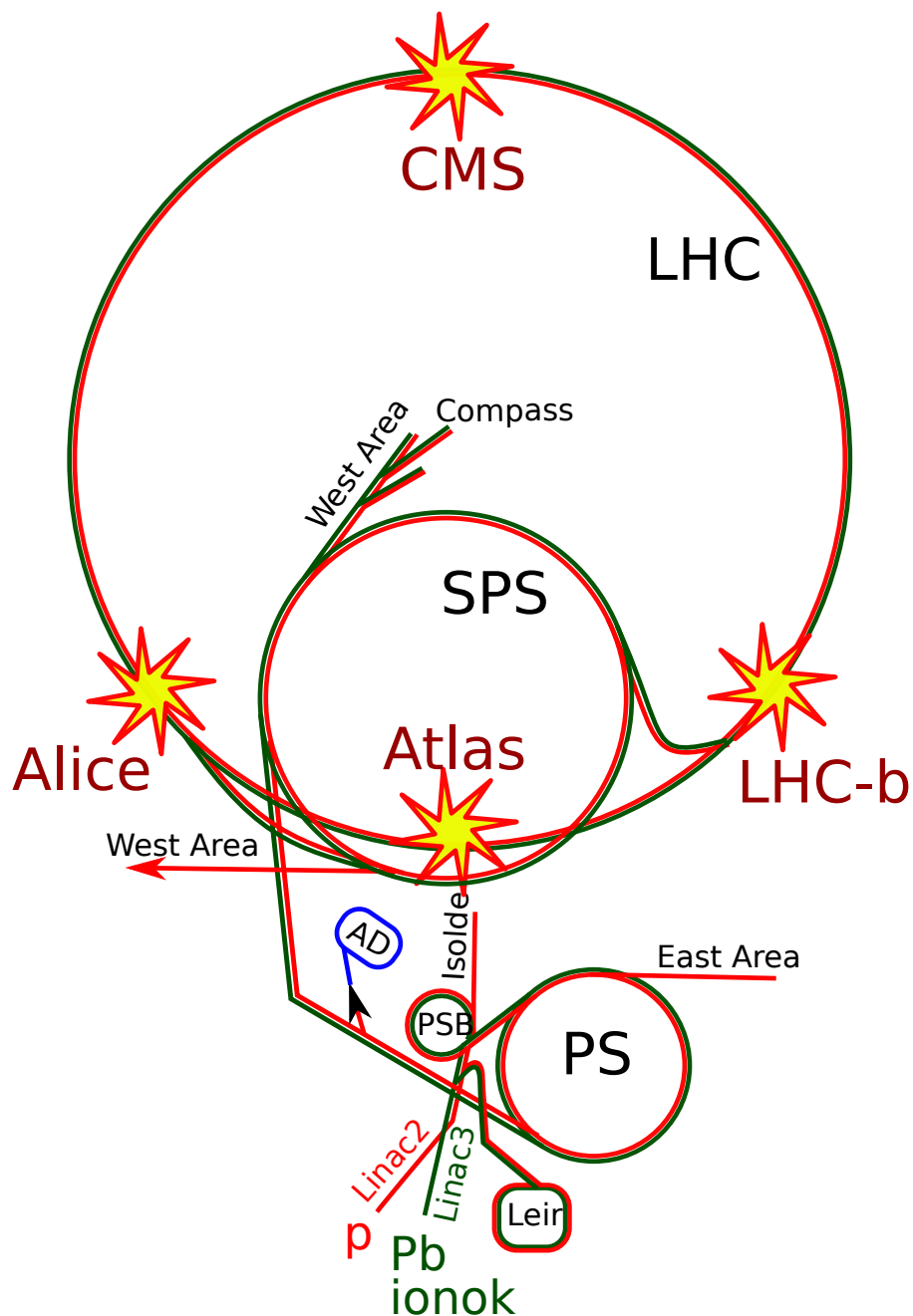
- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban

LHC működési ciklusa



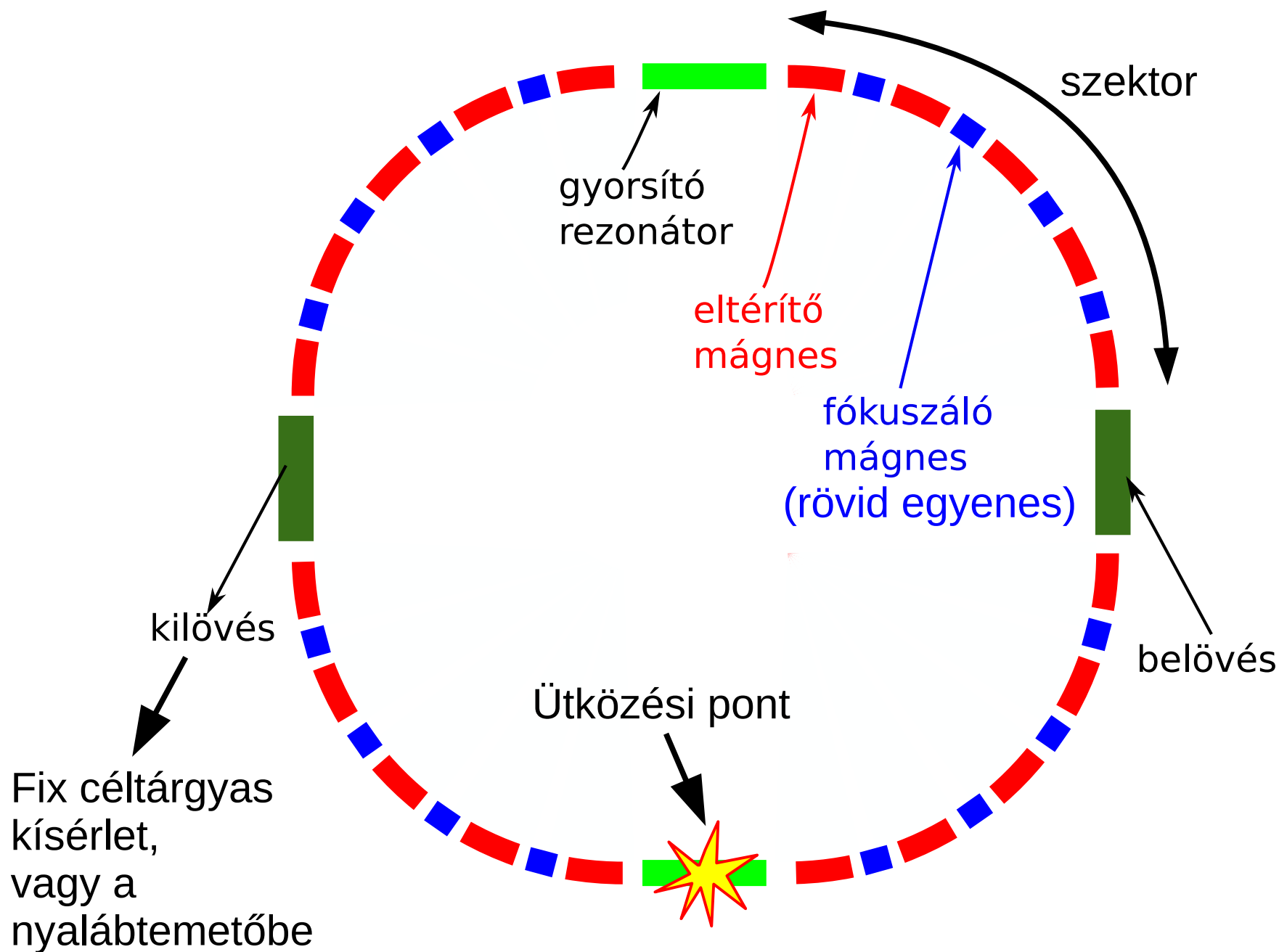
- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban
- Gyorsítás

LHC működési ciklusa

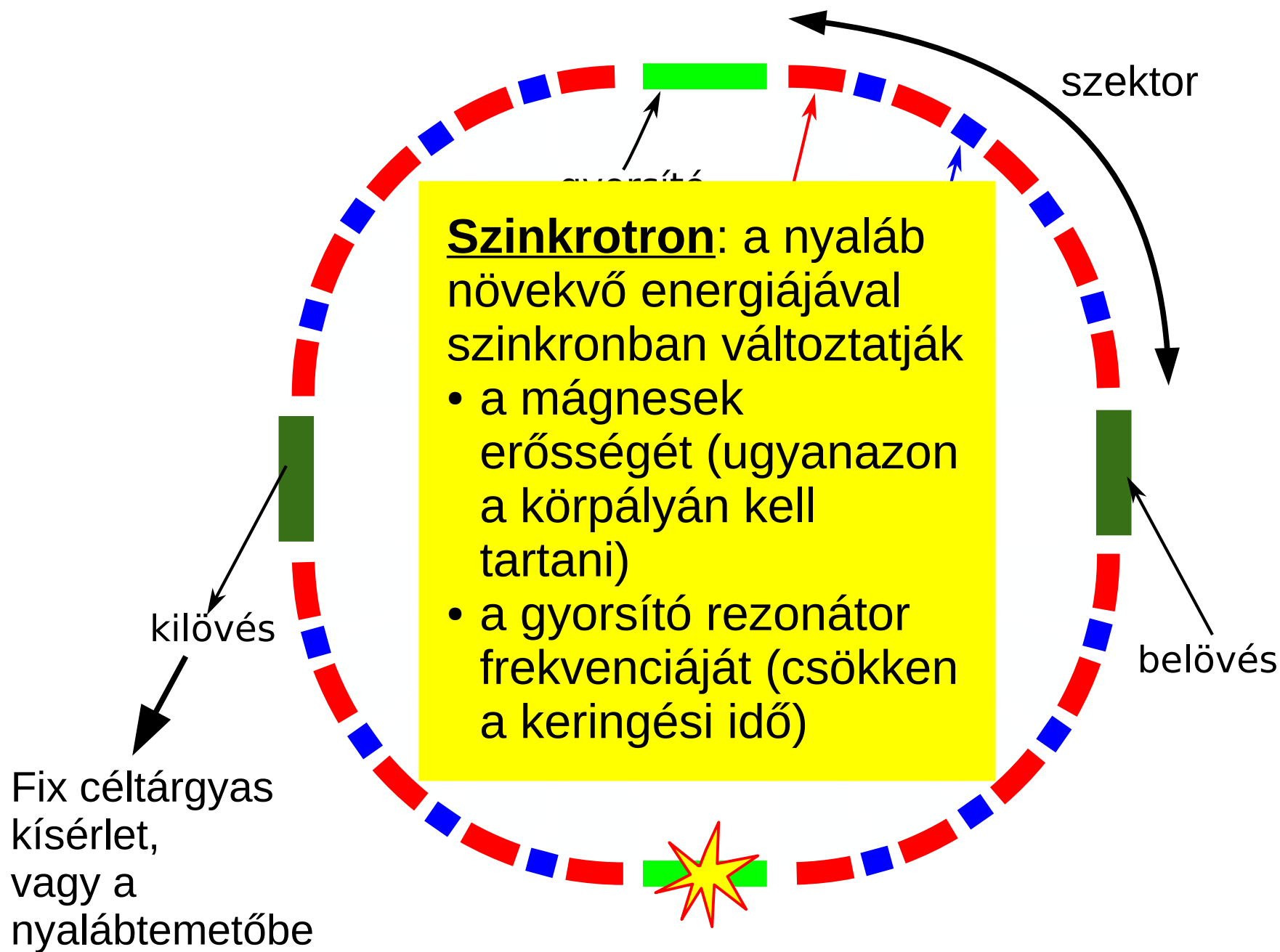


- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban
- Gyorsítás
- **Ütköztetés (~10 óra)**
(eközben az SPS kiszolgálja az álló céltárgyas kísérleteket)
- Kilövés a nyalábtemetőbe
- Mágnesek terének visszacsökkentése
- Újrainicializáció, stb...

A gyűrű gyorsítószakasz: szinkrotron

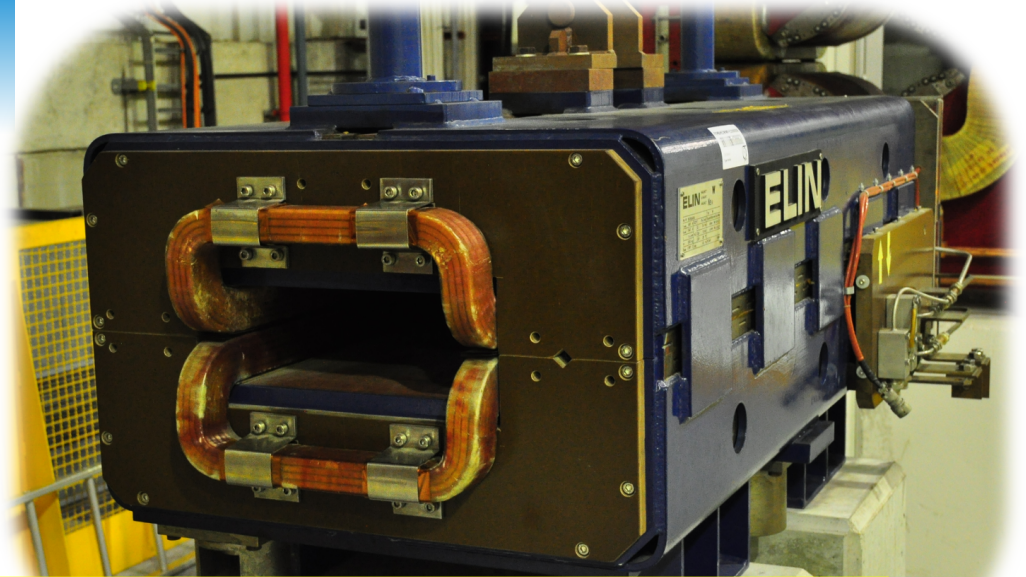


A gyűrű gyorsítószakasz: szinkrotron

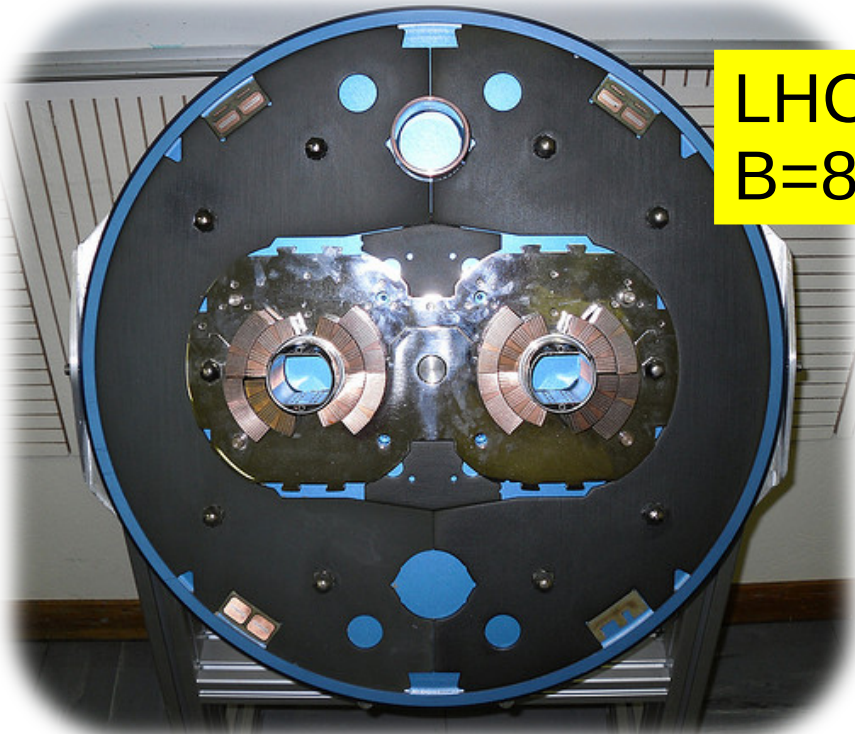


Eltérítő mágnesek

Cél: homogén mágneses teret létrehozni



Normál vezető dipól mágnes

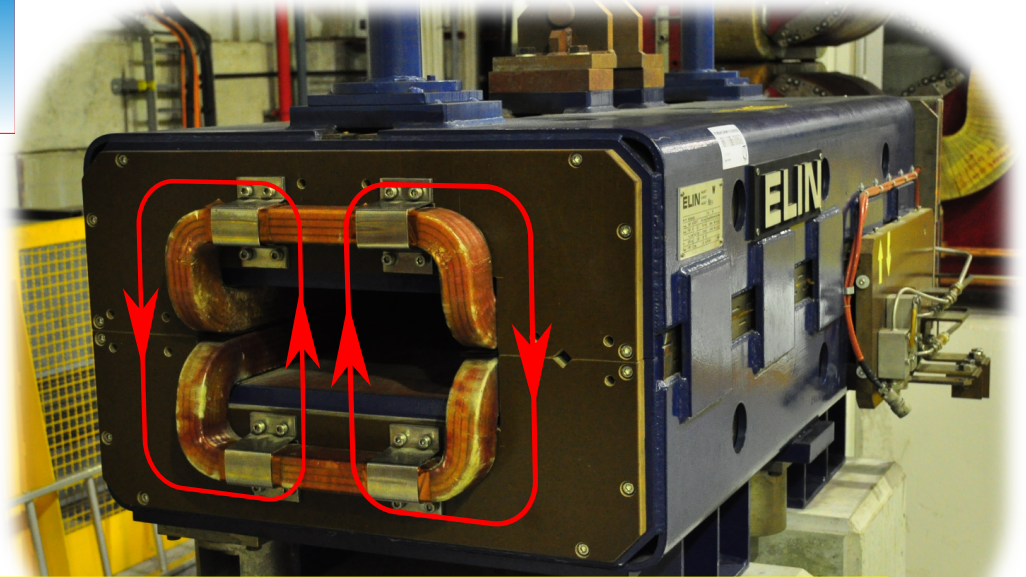


LHC szupravezető mágnesei
 $B=8.4$ Tesla, $T=1.9$ Kelvin

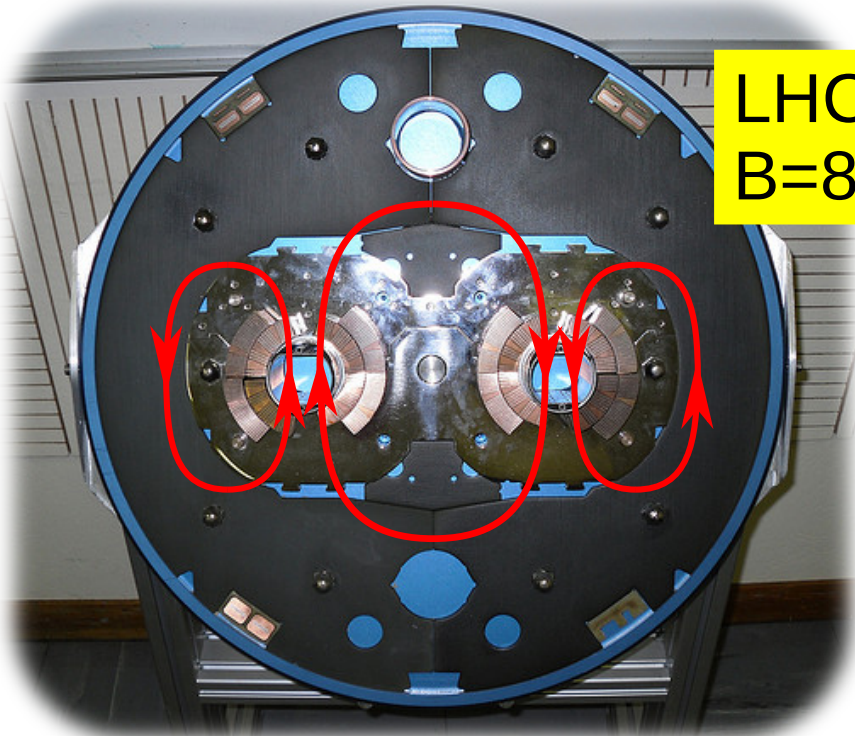


Eltérítő mágnesek

Cél: homogén mágneses teret létrehozni



Normál vezető dipól mágnes

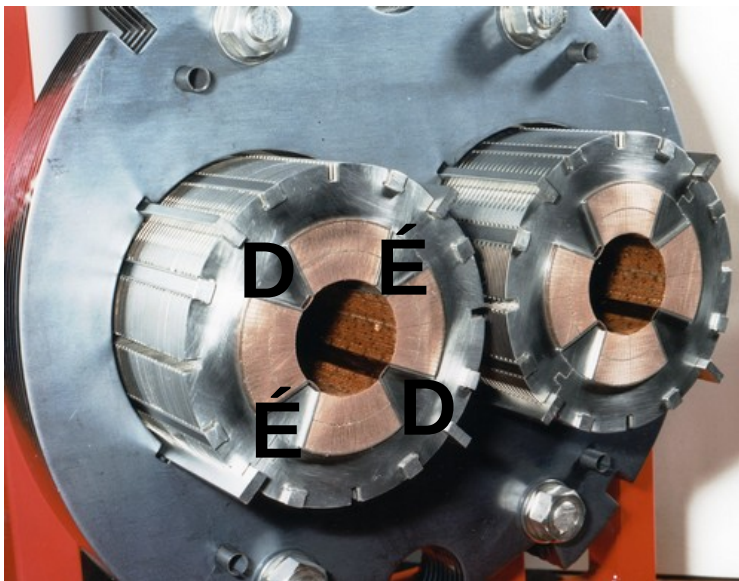
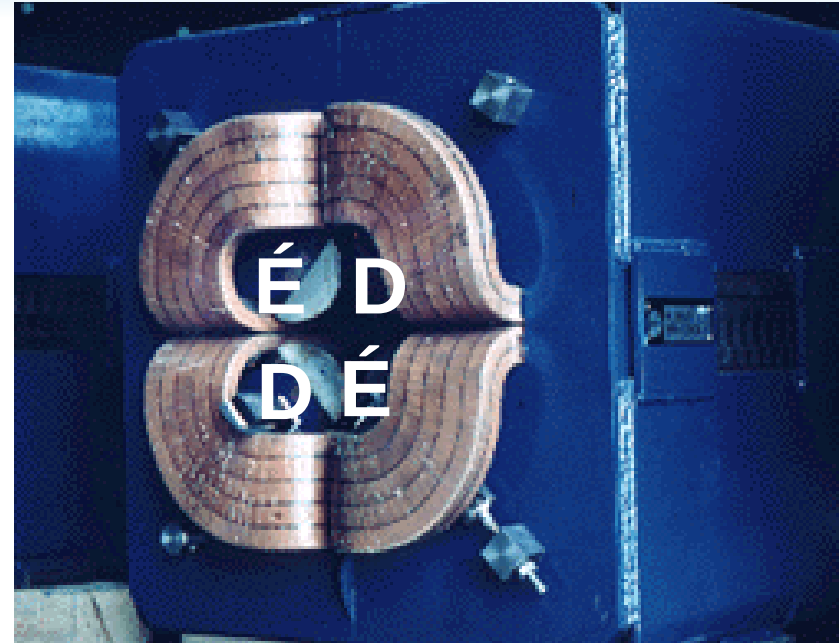


LHC szupravezető mágnesei
 $B=8.4$ Tesla, $T=1.9$ Kelvin



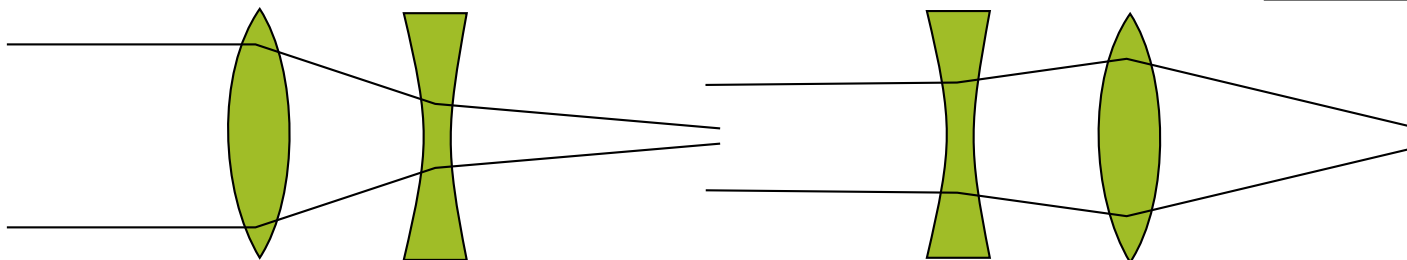
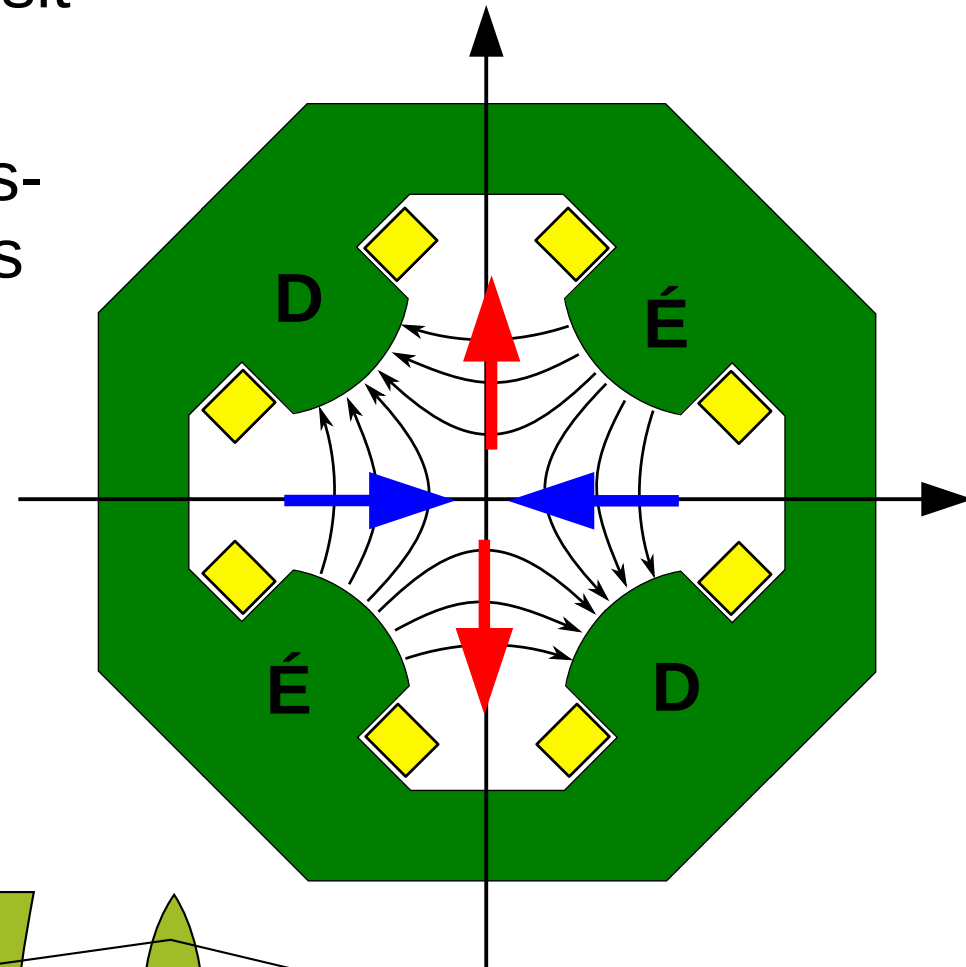
Fókuszáló mágnesek – az egyenes szakaszokban

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



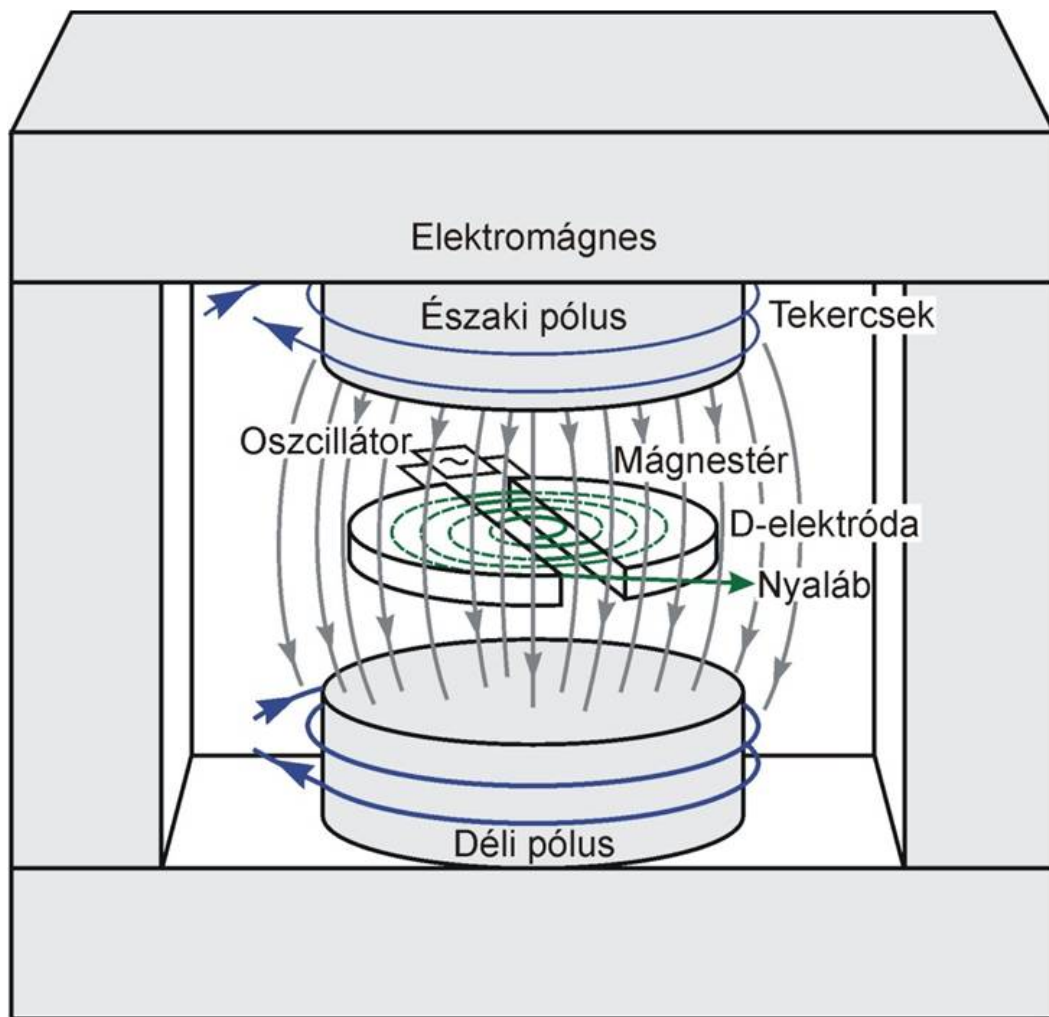
Fókuszáló mágnesek – az egyenes szakaszokban

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



Más gyorsítófajták

Ciklotron

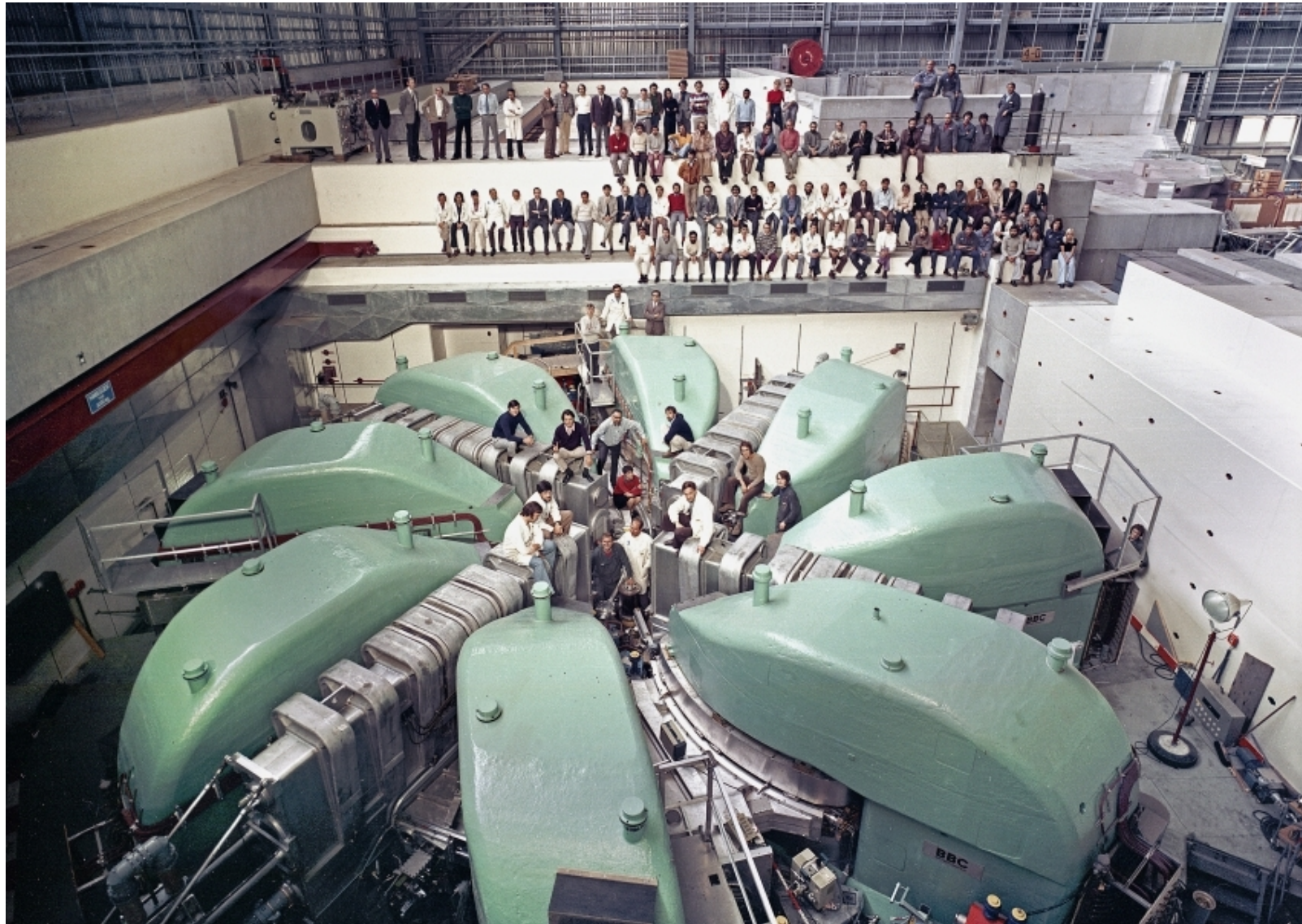


- Amíg nemrelativisztikus:
 - impulzussal arányosan nő
 - a pályasugár (megtett út)
 - sebesség
- A keringési frekvencia tehát nem változik
- Részecske szinkronban marad a gyorsító, váltakozó térrel
- Wideroe linac "felcsavarva"



Lawrence & Livingston: első ciklotron (1931)

Ciklotron: Paul Scherrer Institut (CH)



- 590 MeV, proton
- Kutatási, ipari célokra

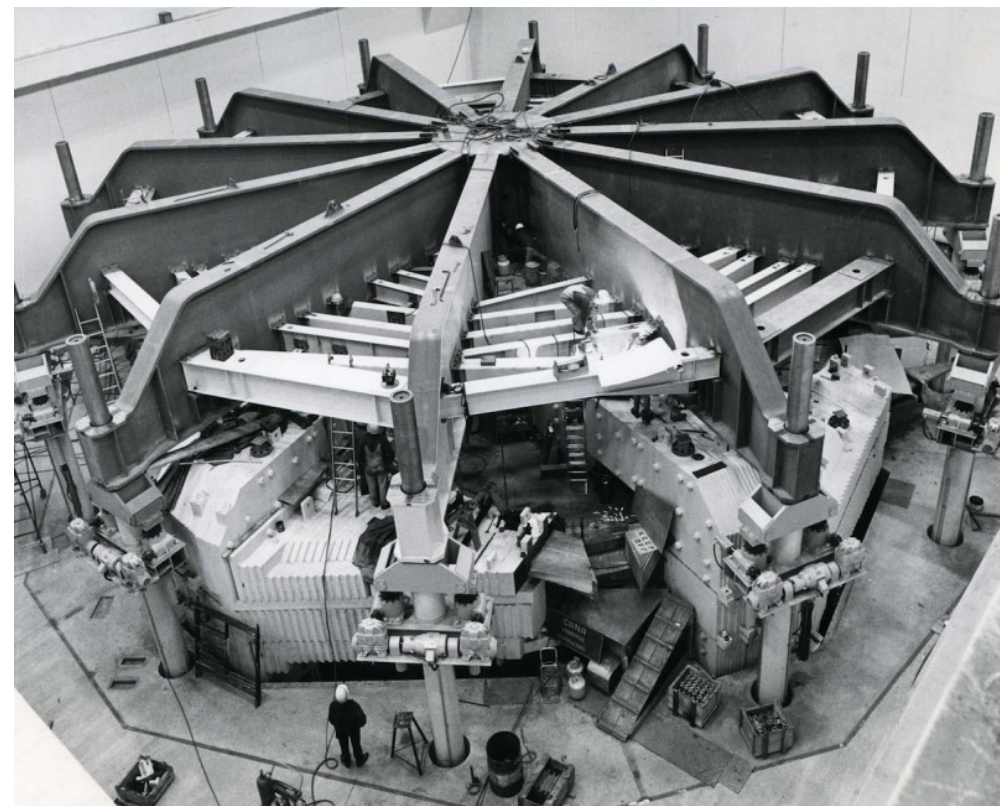
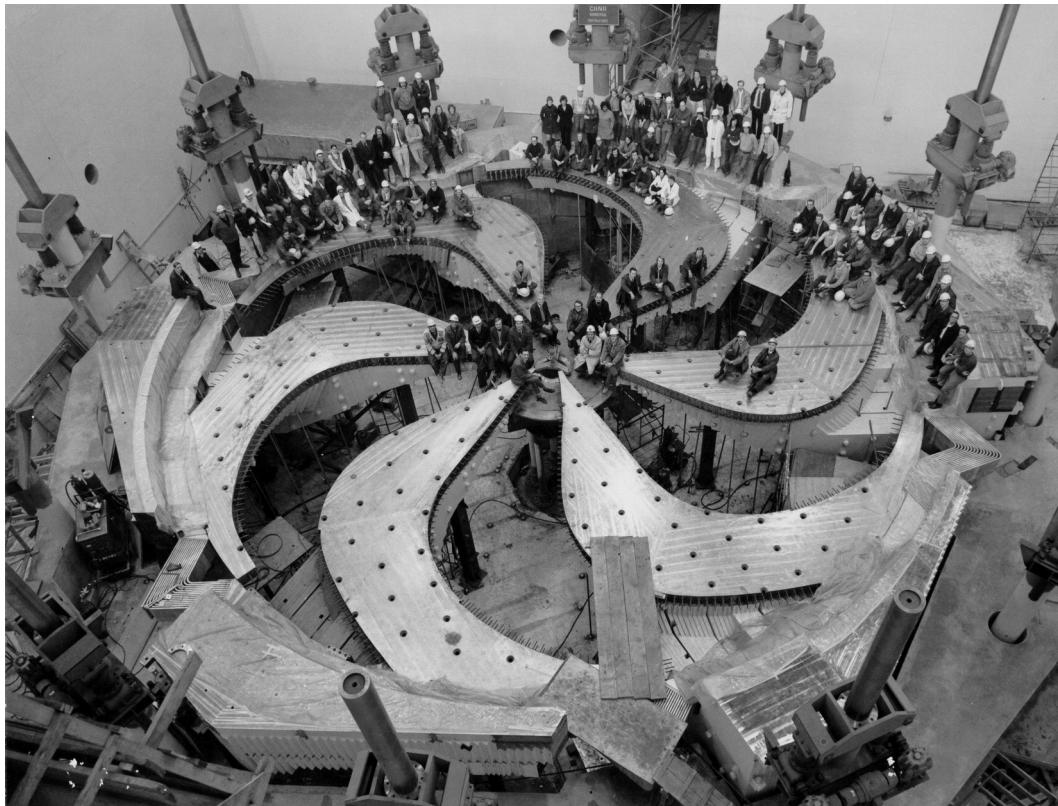
Ciklotron: Paul Scherrer Institut (CH)

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



Ciklotron: TRIUMF (Kanada)

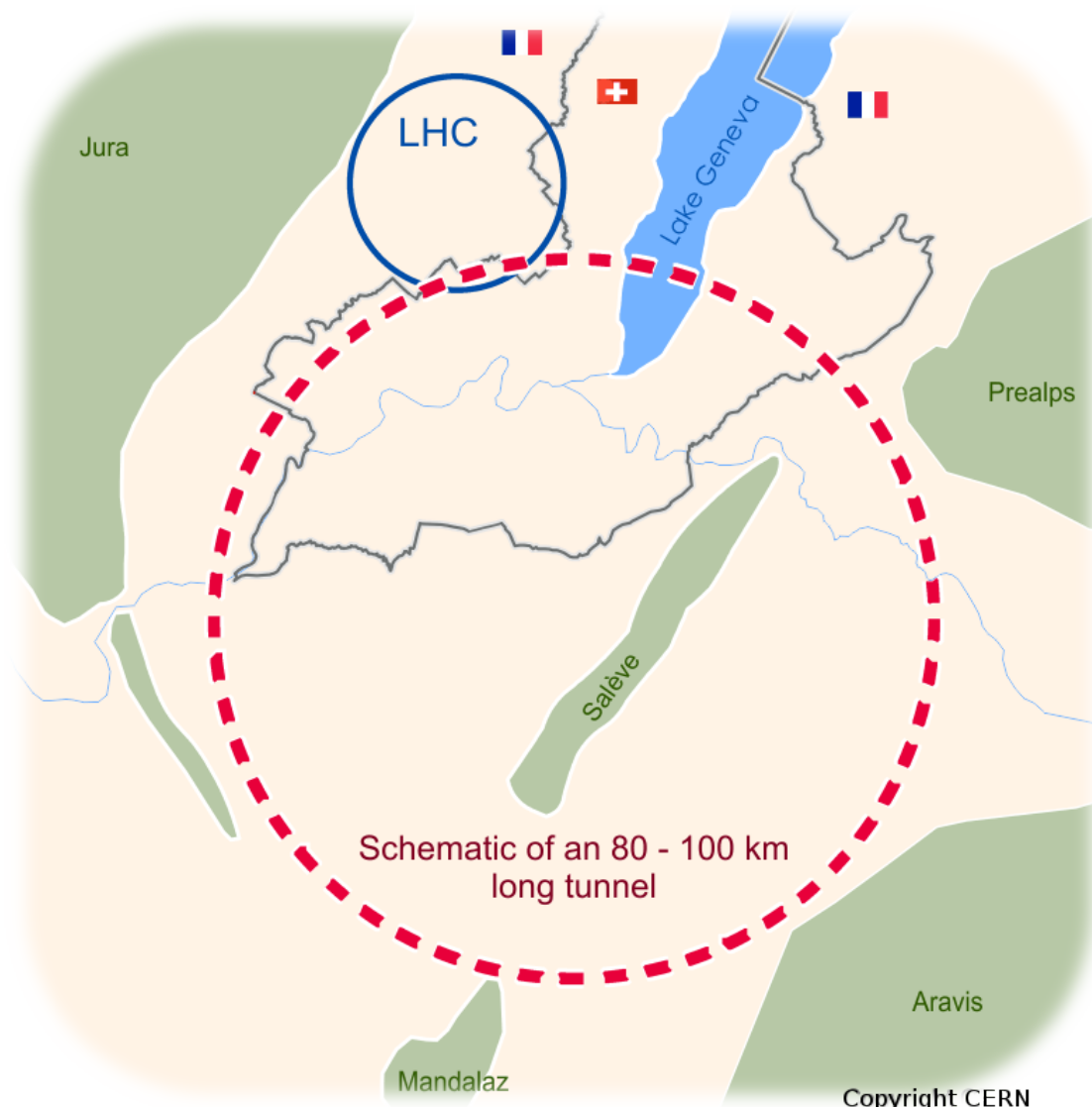
- 520 MeV, proton
- Kutatási célra



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

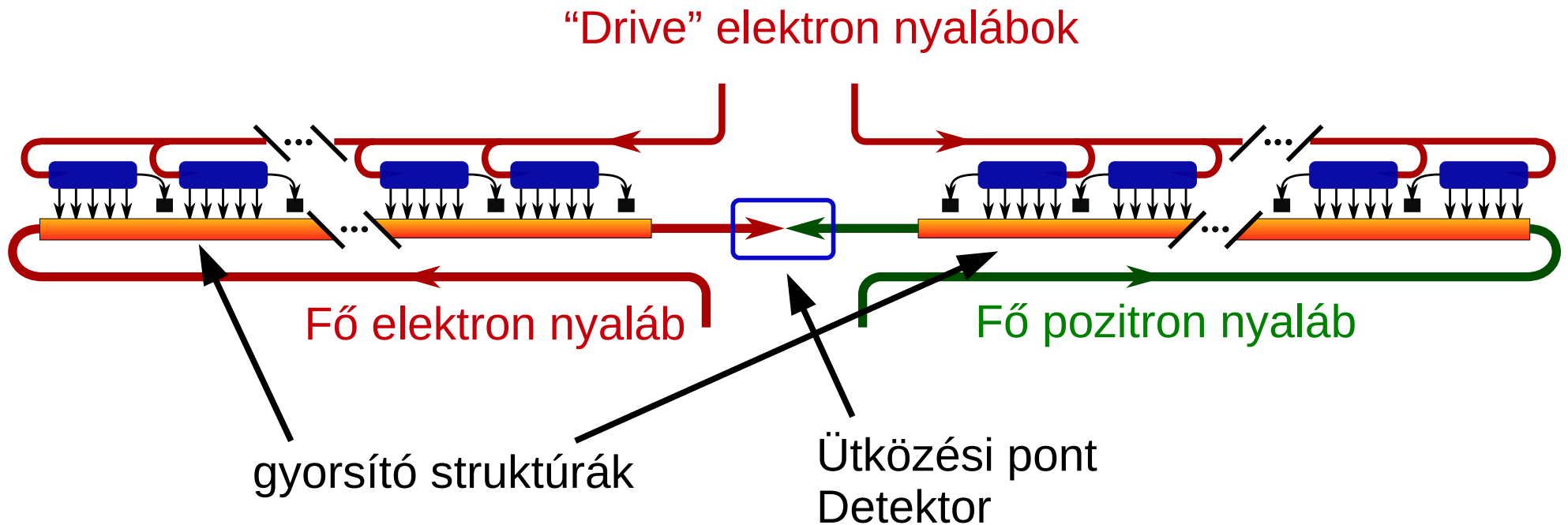


Kitekintés: Kínai super proton collider

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

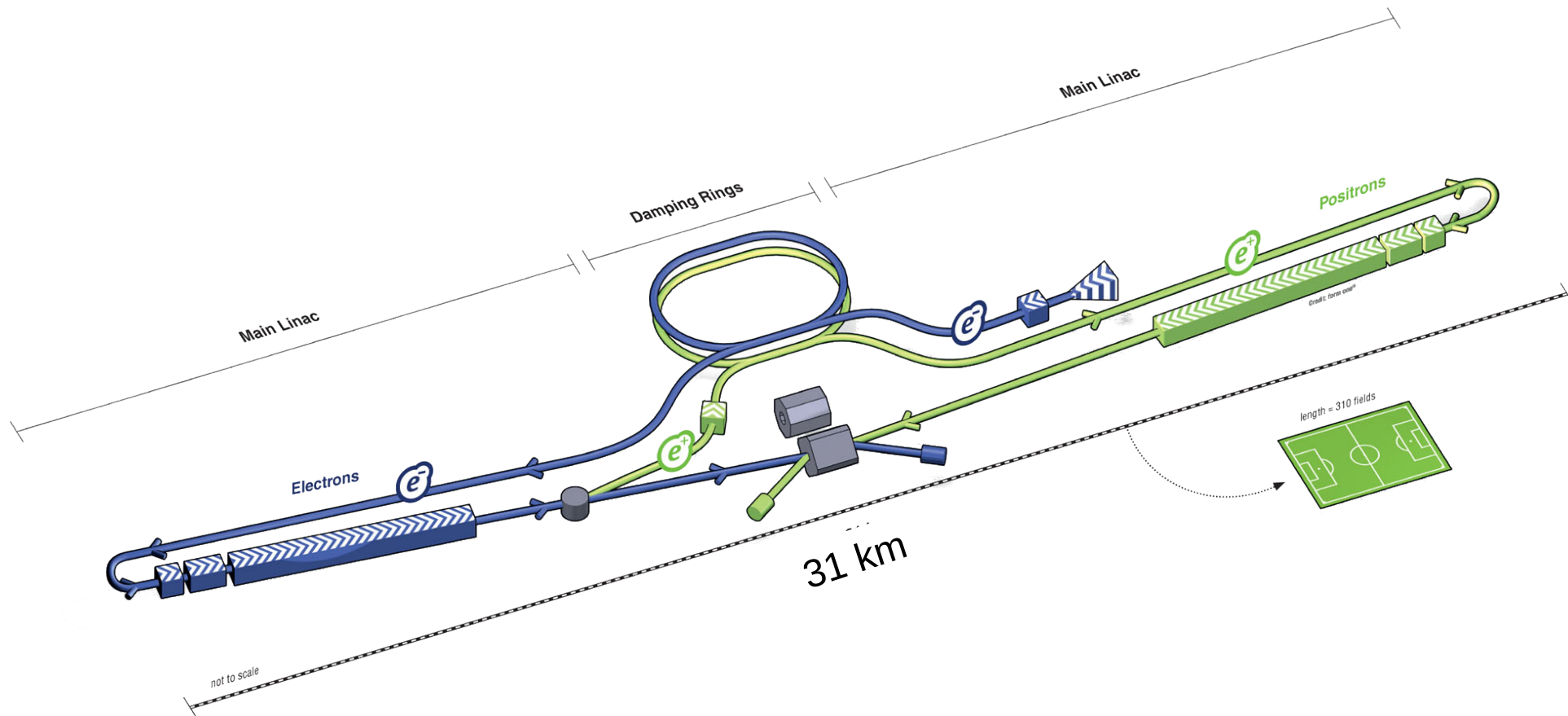
Kitekintés: CLIC

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



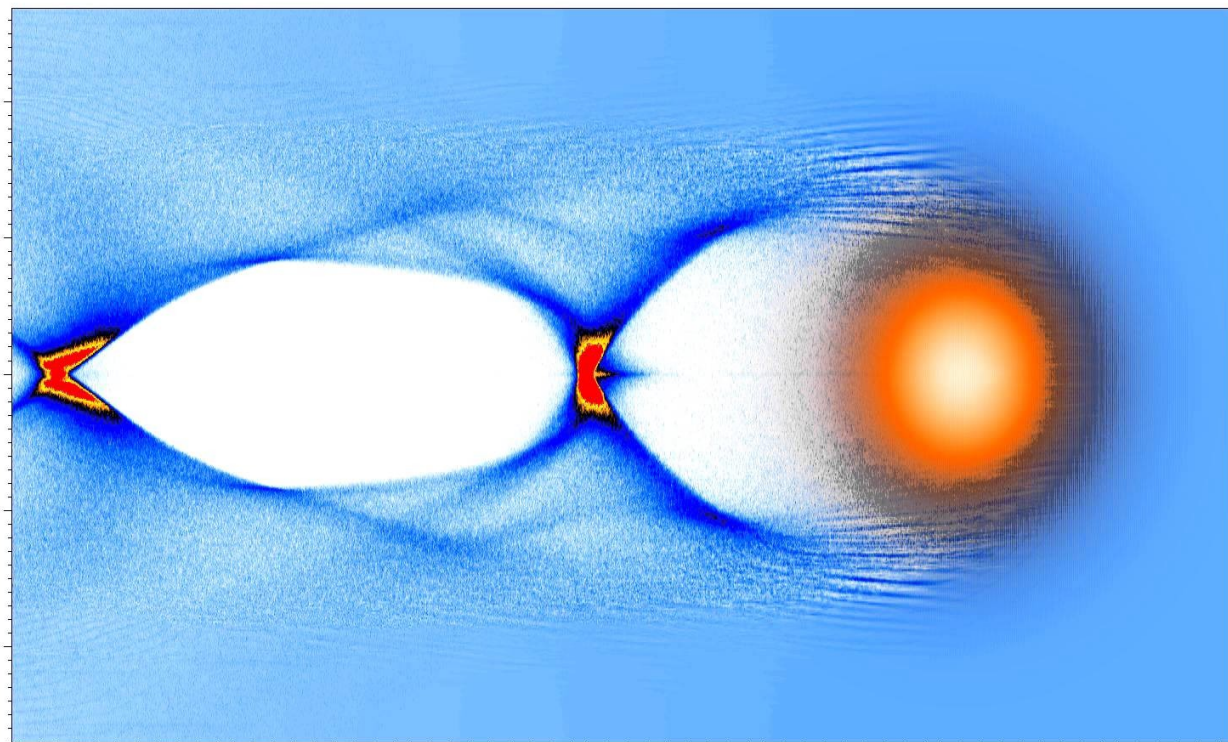
Kitekintés: ILC

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



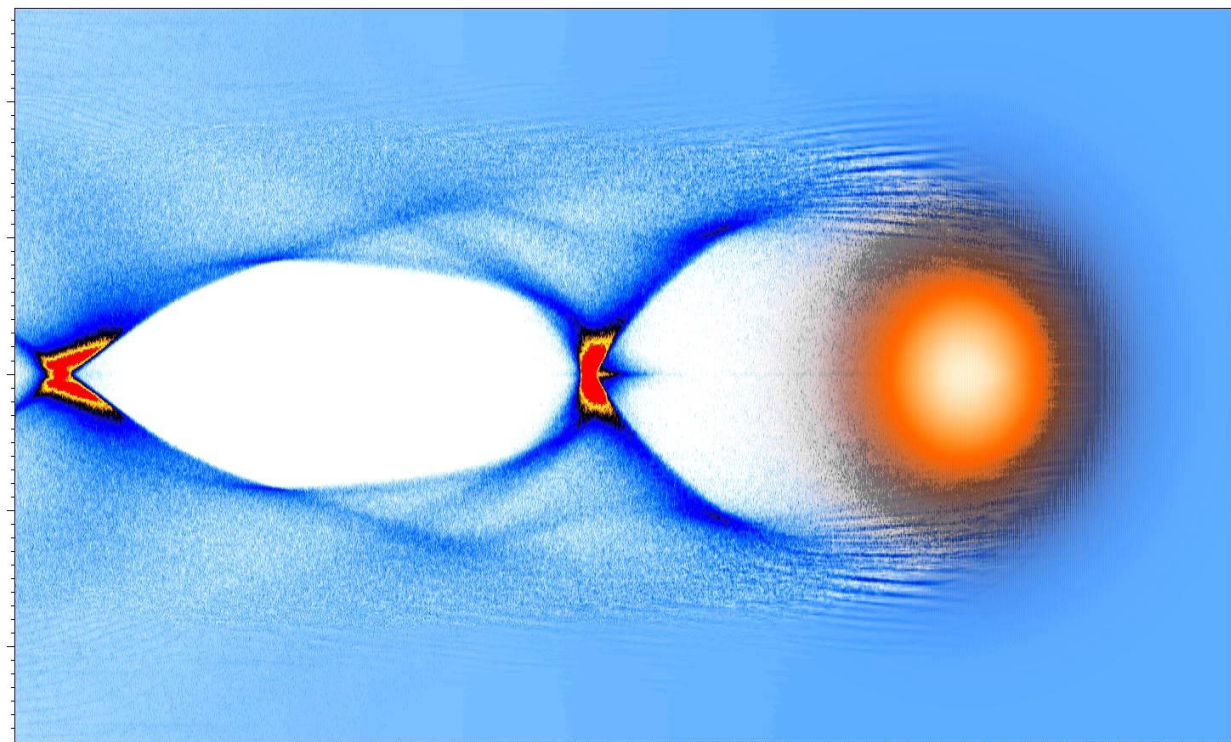
Gyorsítás plazmában

- 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
- Mai rekord plazmában:
 - 9 cm \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
- Kísérletek lehetnek ütköző-nyalábosak vagy fix céltárgyasak
- Igen ambíciózus gyorsítóépítési tervek...

A lelkes érdeklődőknek.
Fizikaórához is jól jöhet...

Érdemes kiszámolni (és a diákokkal is kiszámoltatni) – durva számok fognak kijönni
(szeretnél beszélni róla? - barna.daniel@wigner.mta.hu)

- 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?
- 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...
(szeretnél beszélni róla? - barna.daniel@wigner.mta.hu)

- 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 részecskének csomagokban kell érkezniük. Hogyan maradnak együtt órákon keresztül, “csomagokban”, jóllehet a sebességük mindig kicsit eltérő?