Részecskegyorsítók

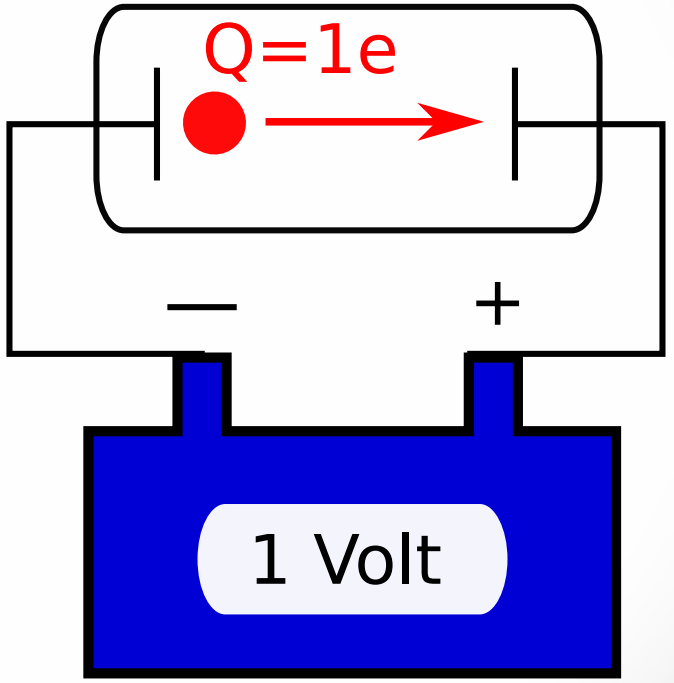
Barna Dániel

University of Tokyo
Wigner Fizikai Kutatóközpont

- Részecskegyorsítók a háztartásban
- Töltött részecskék manipulálása
- Miért akarunk nagyenergiás gyorsítókat?
- A klasszikus nagyenergiás gyorsítók részei és alapelvek
- Kitekintés, tervek...

Energia mértékegység

- 1 elektronvolt = e * 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

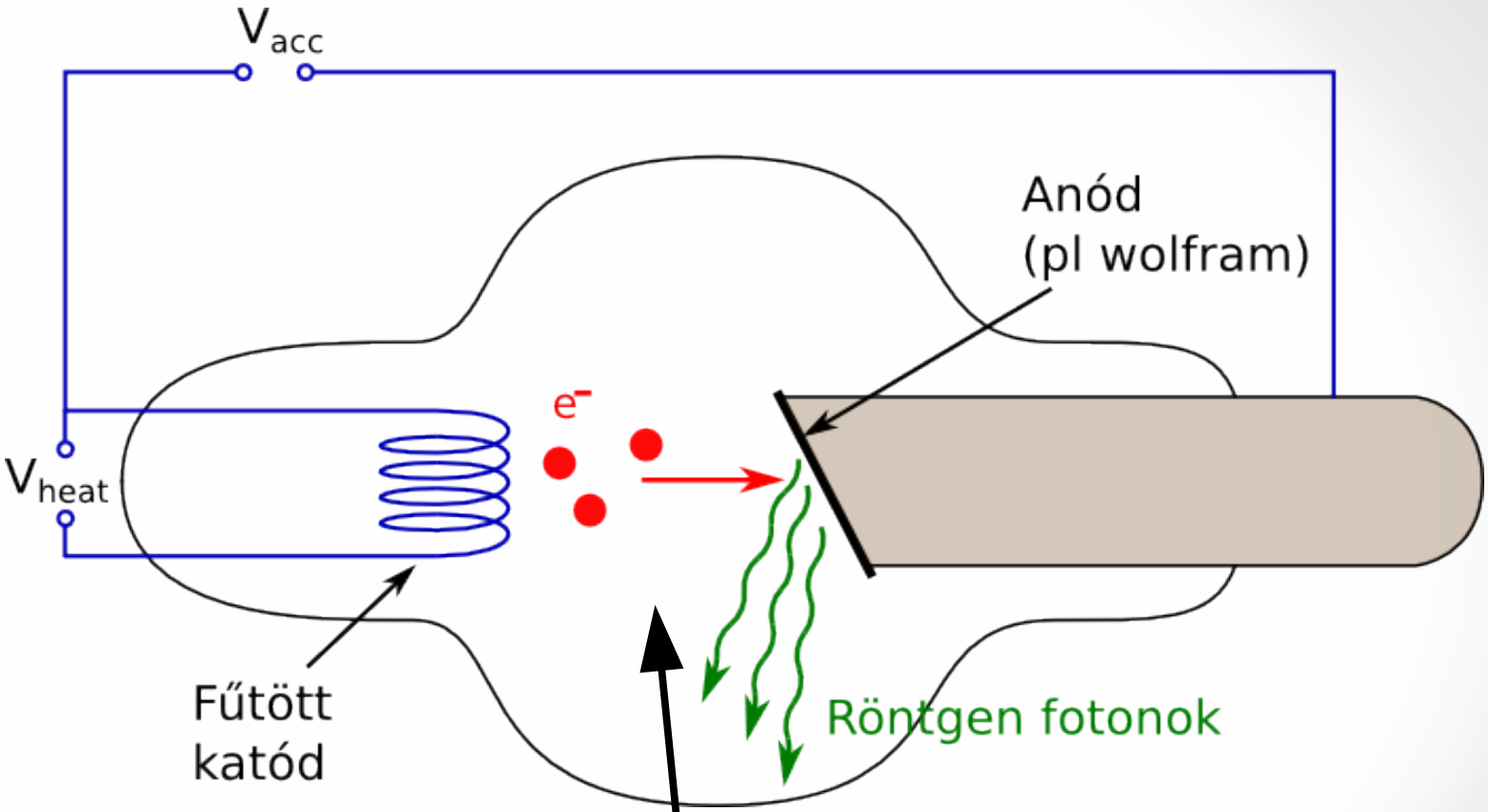
$$F = q\,\vec{E}$$

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

Töltött részecskék manipulálása

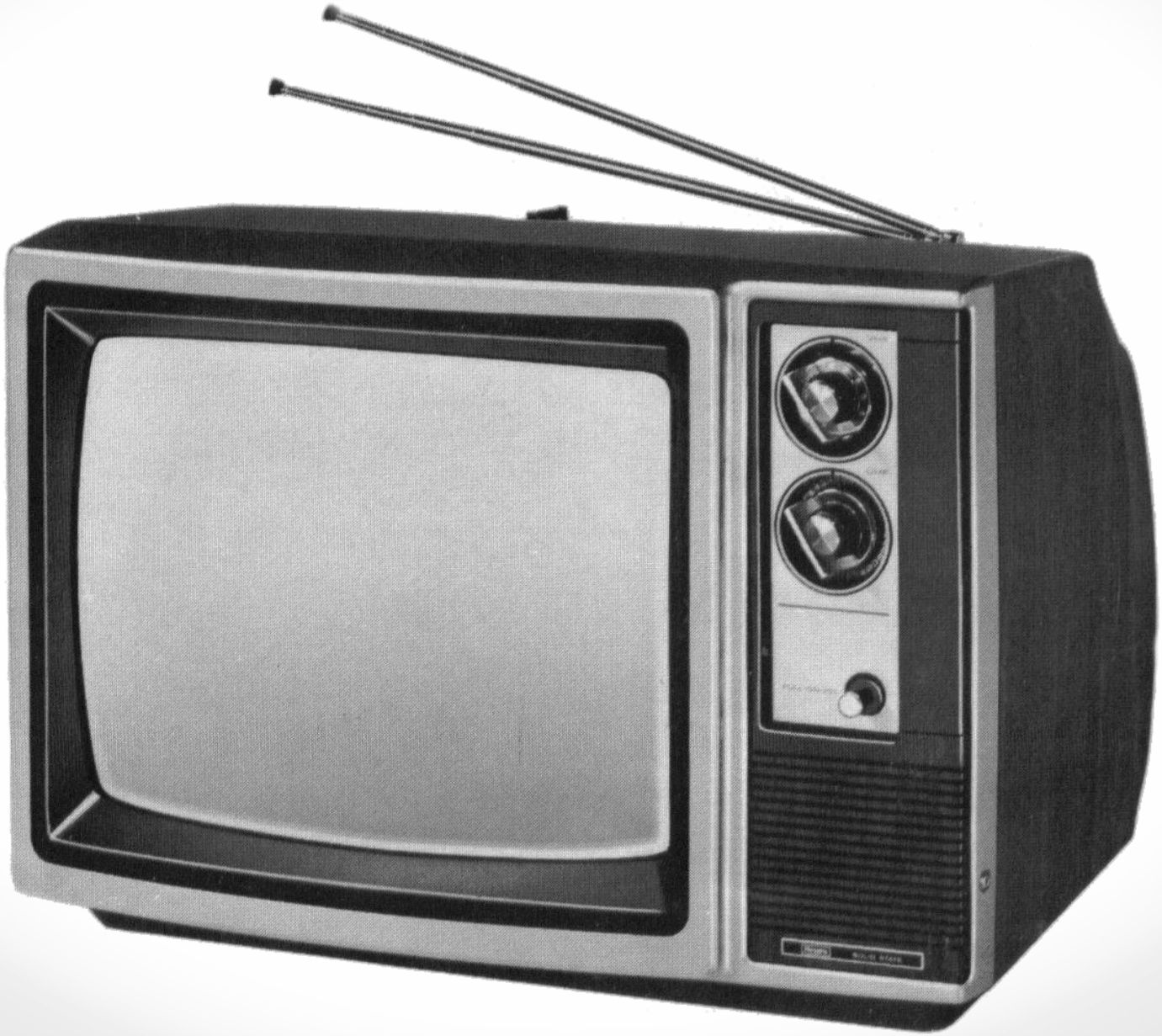
- MINDIG az elektromos tér gyorsít
- (de rengeteg módja van, hogy hogy állítsuk elő ezt az elektromos teret)
- Nagyenergiás részecskegyorsítókban tipikusan mágnesek térítik el (tartják körpályán, fókuszálják) a nyalábot
- “Gyorsítómágnes” = a gyorsító mágnese
  ≠ olyan mágnes ami gyorsít

Röntgen-cső



10-100 keV mini
elektron-gyorsító

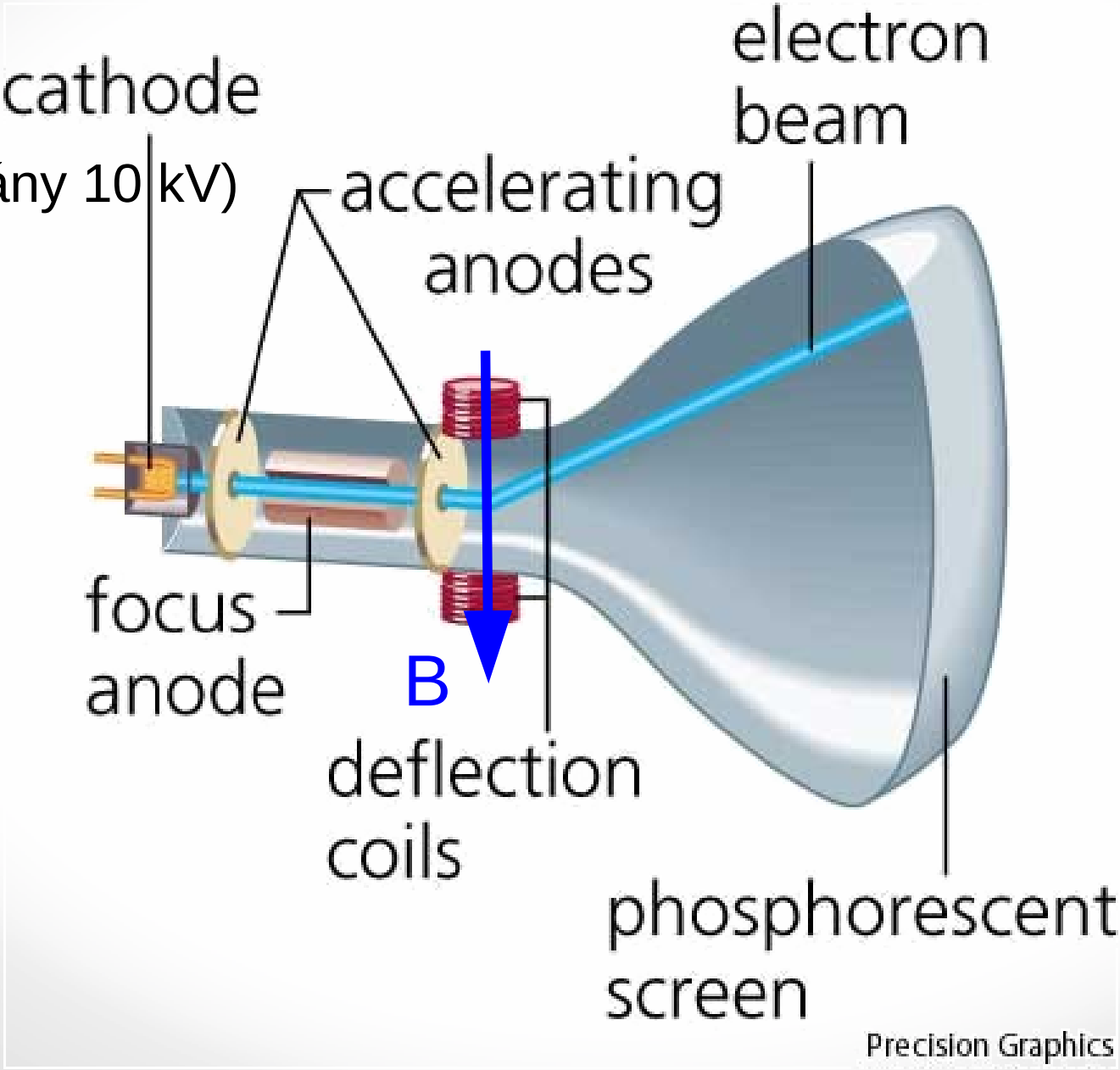
Katódsugaras TV



Katódsugaras TV

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

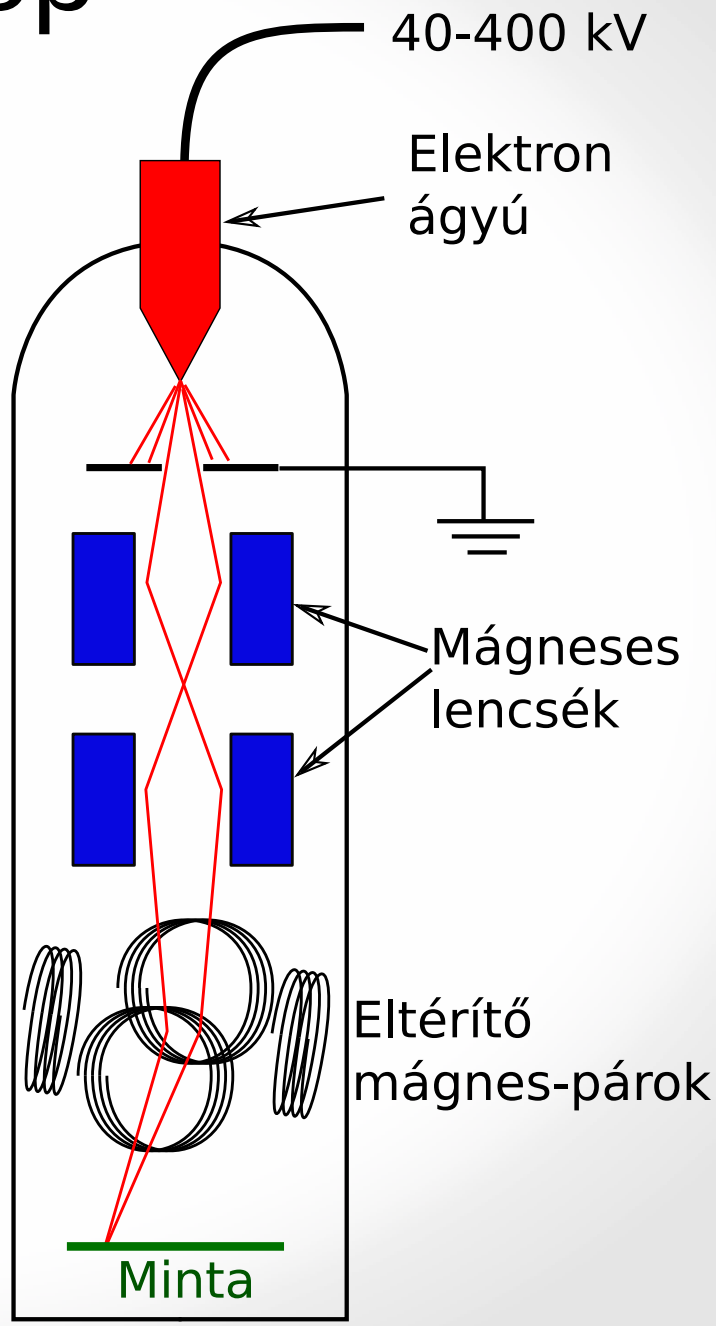
Katódsugaras TV



Katódsugaras TV

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

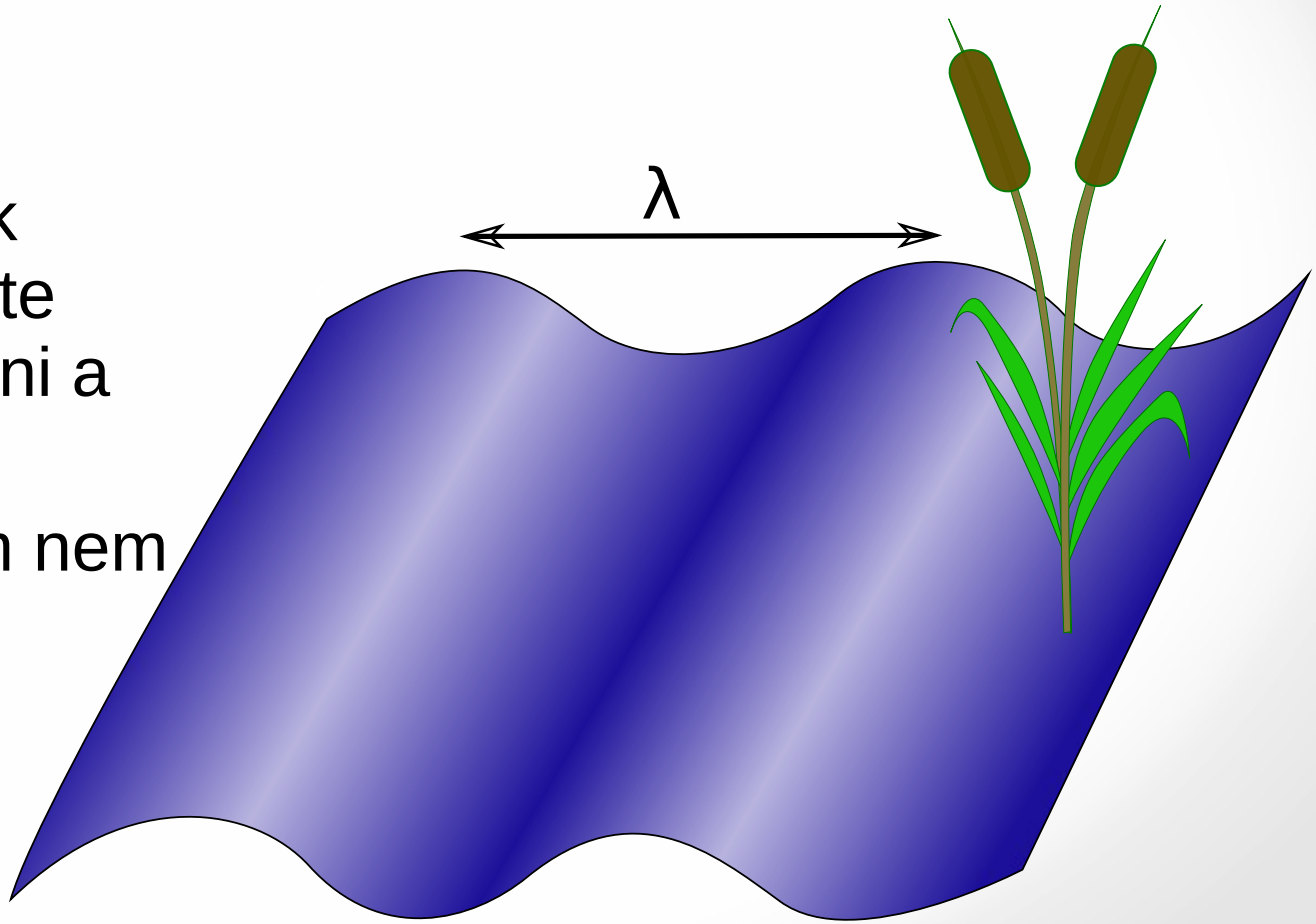
Elektron mikroszkóp



Apropó mikroszkóp....

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

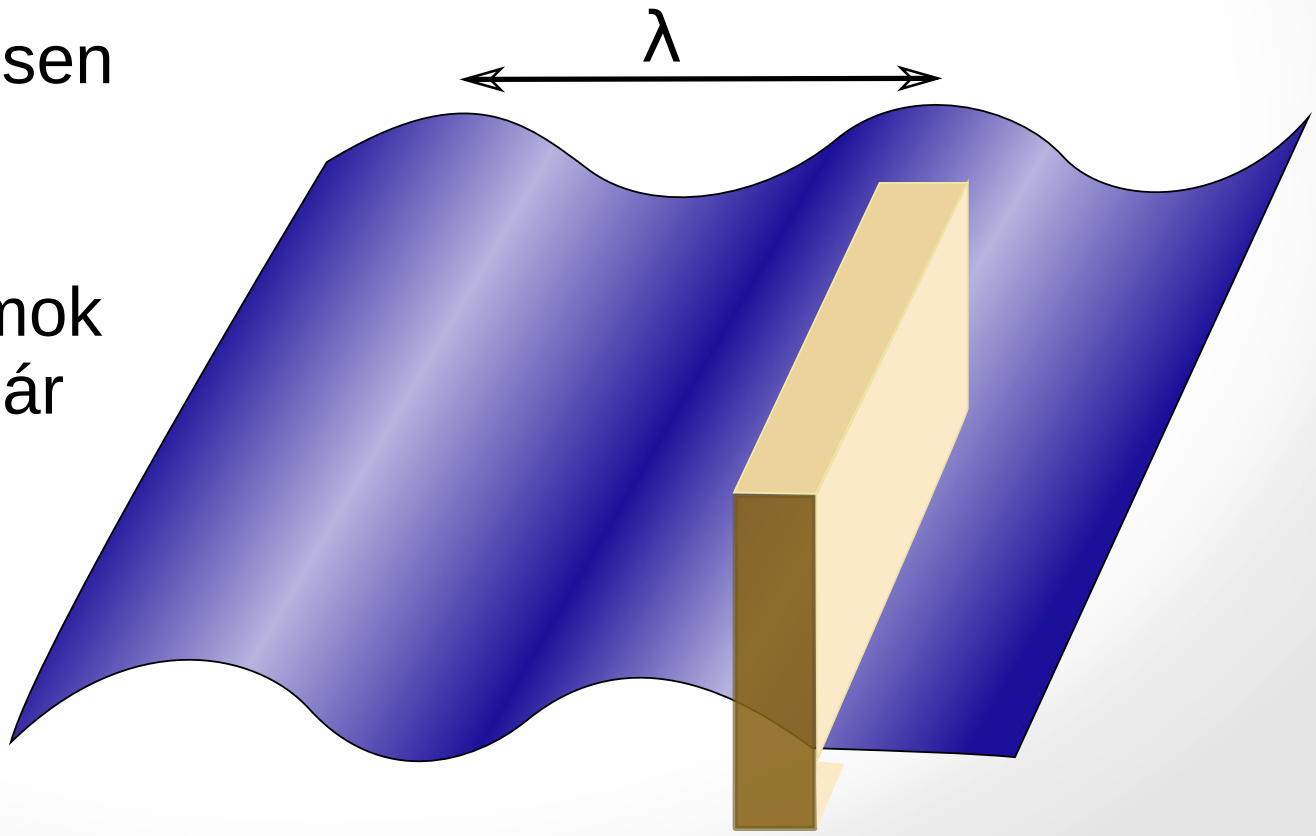
- Nádszál << λ
- A nádszál “nem sok vizet zavar”, mögötte nem fog megváltozni a hullámforma
- Ez a hosszú hullám nem alkalmas a kis objektumok feltérképezésére



Apropó mikroszkóp....

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

- Fal ≈ λ
- A fal mögött jelentősen megváltozik a hullámforma
- Ekkora (λ) objektumok feltérképezésére már használható ez a hullám

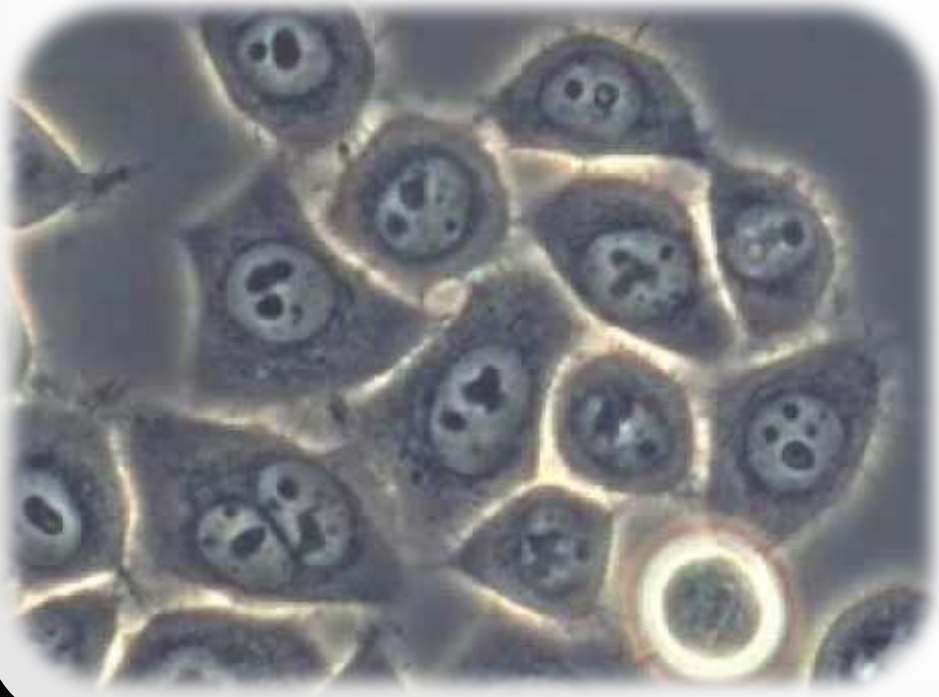


Apropó mikroszkóp....

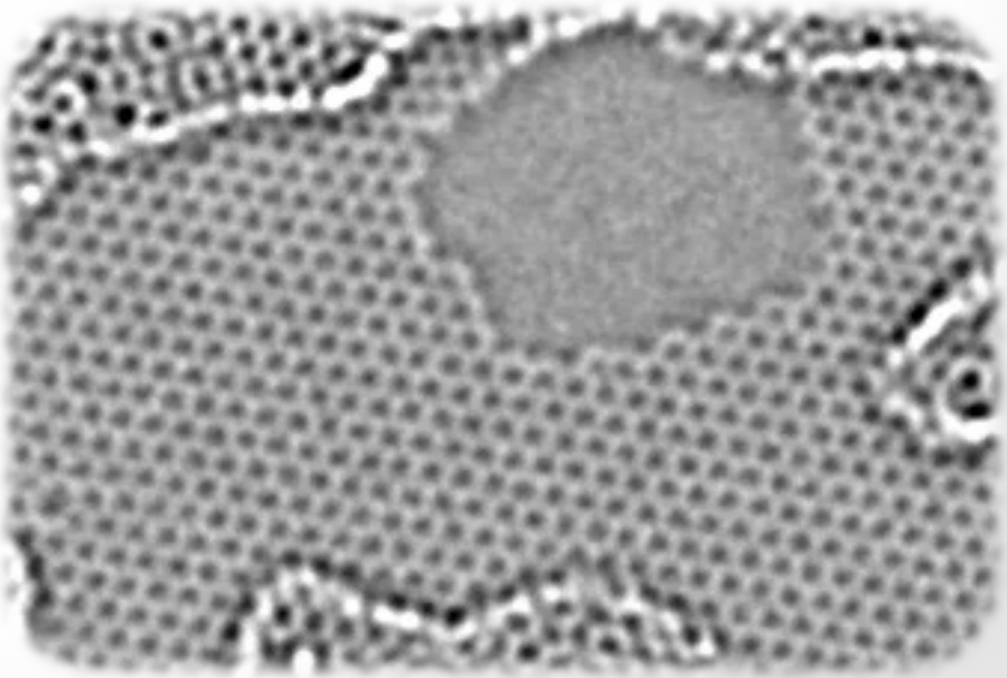
de Broglie összefüggés: $\lambda = \frac{h}{p}$

Nagyobb energia → rövidebb hullámhossz → nagyobb felbontás

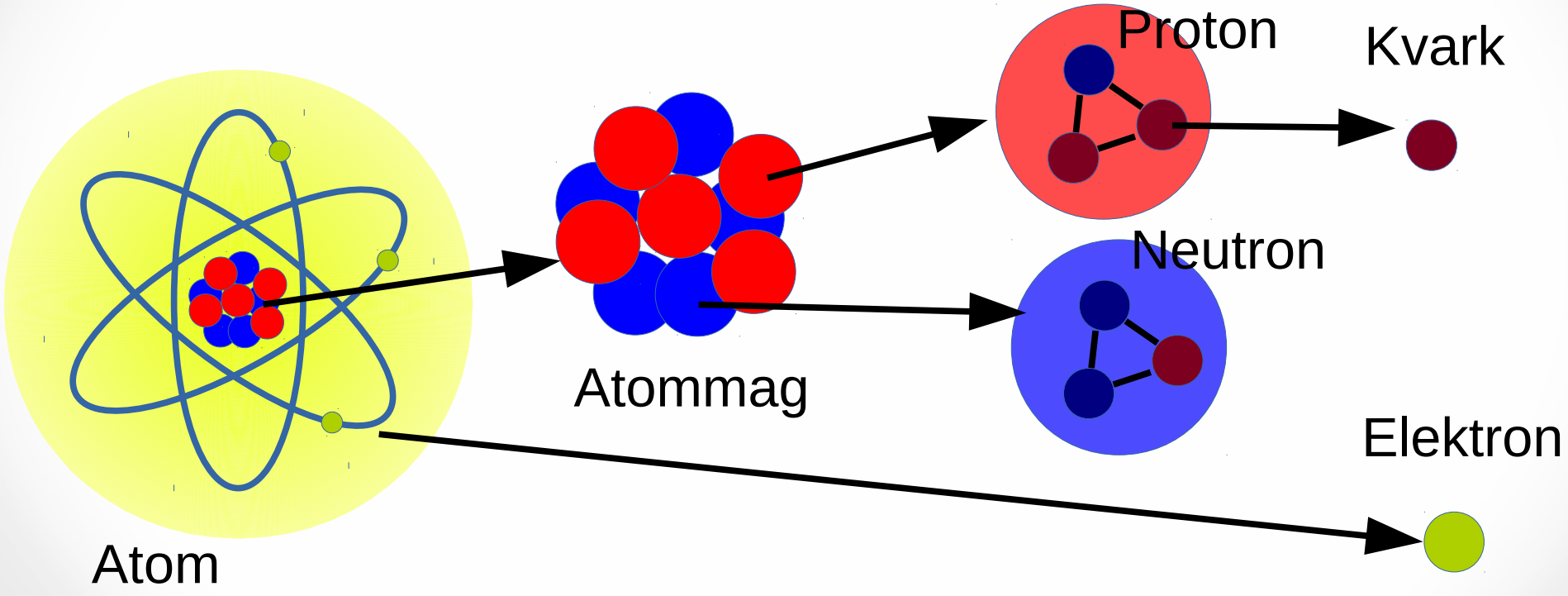
Fény: pár száz nm
pl sejtek



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 -

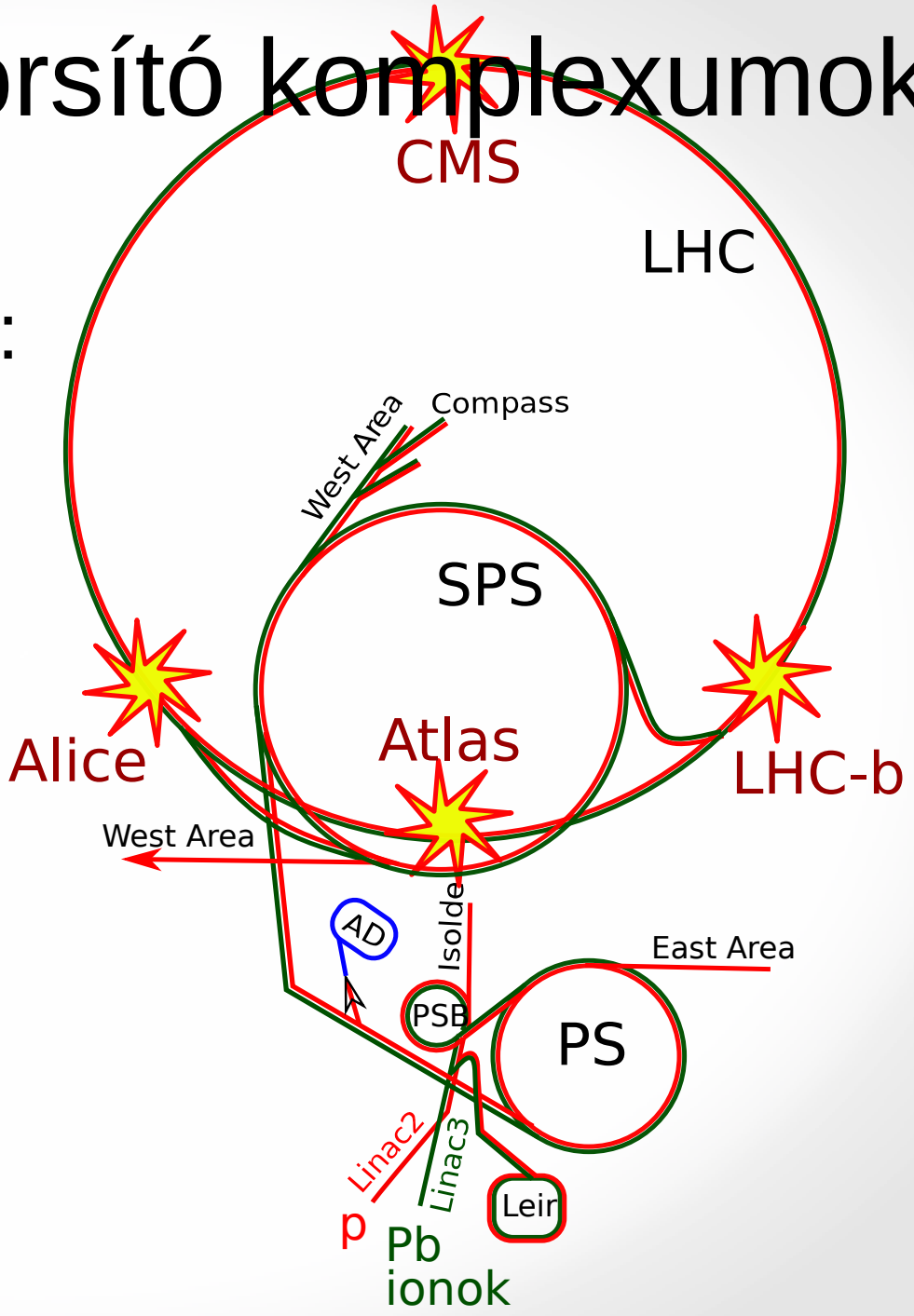
annál nagyobb tömegű új, eddig nem látott részecskéket fedezhetünk fel

Miben más még mint a “hagyományos” mikroszkópok?

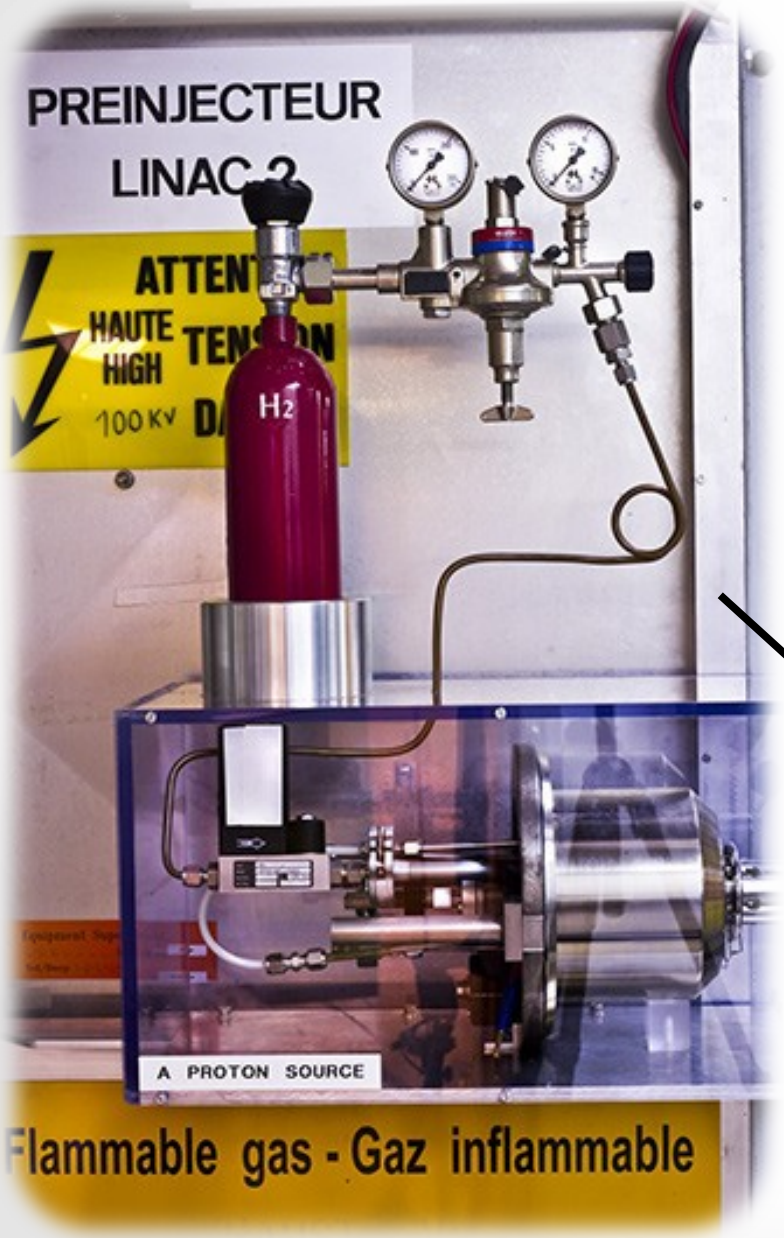
- “Hagyományos” mikroszkópban “valami más objektumot” vizsgálunk egy adott sugárzással
- A nagyenergiás gyorsítókban használt “hullám” v. “sugárzás” által vizsgált “minta” már gyakran saját maga... :
- ha két nyalábot egymásnak ütköztetünk.

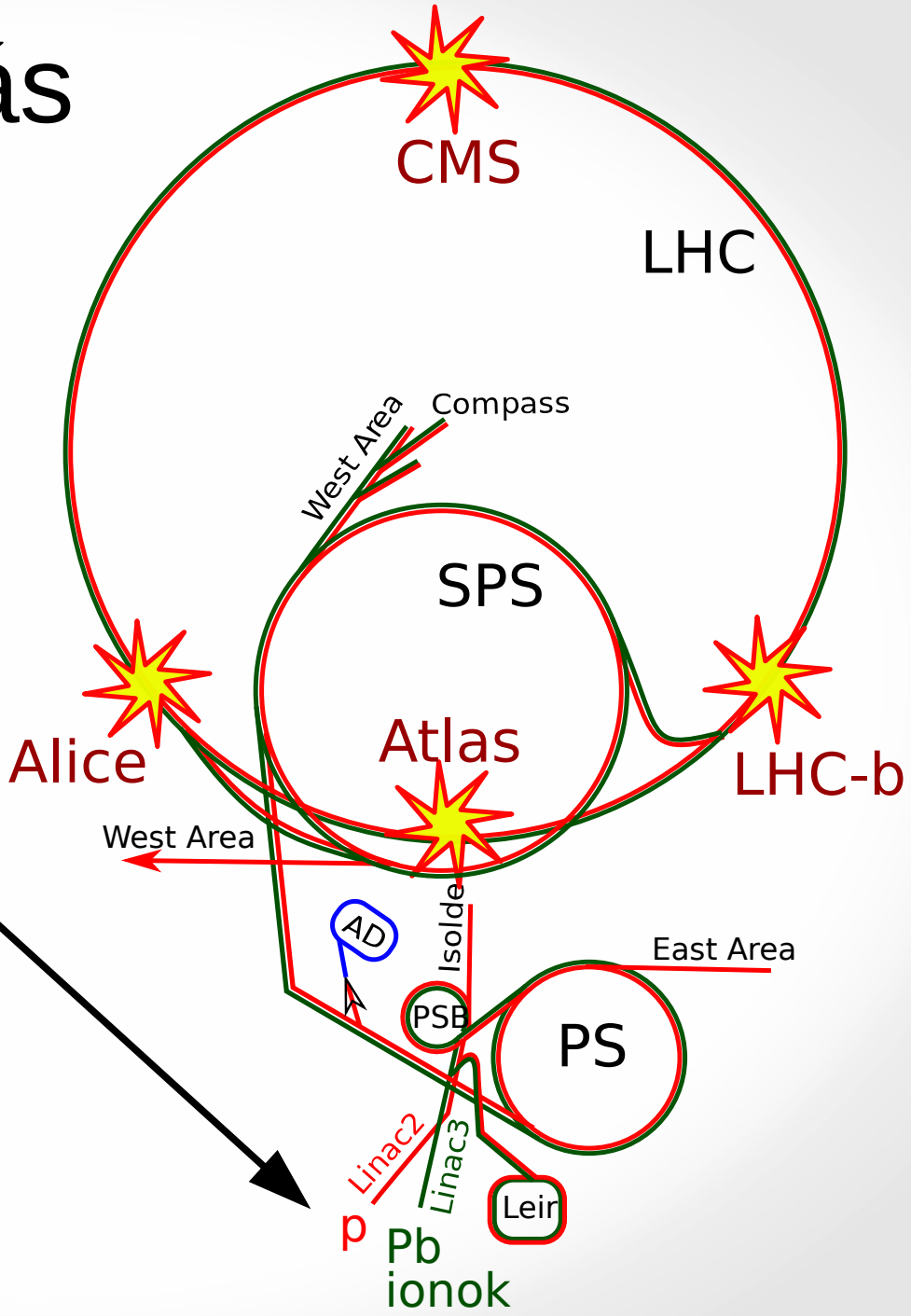
Nagyenergiás gyorsító komplexumok

- Több fokozatból állnak:
- Forrás
- Lineáris szakasz
- Gyűrű szakaszok



A részecskeforrás





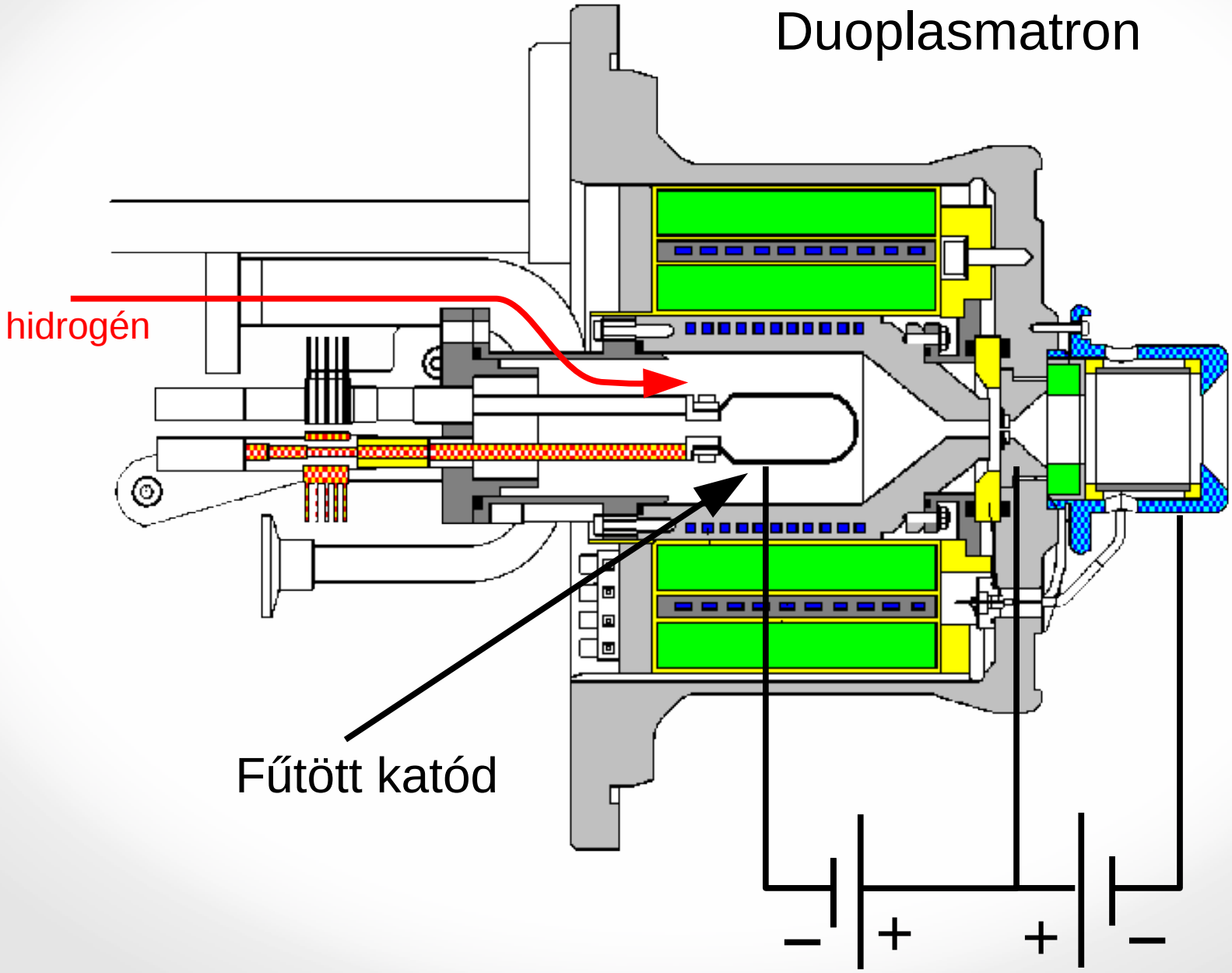
Mennyi hidrogént fogyasztunk?

CERN-LHC:

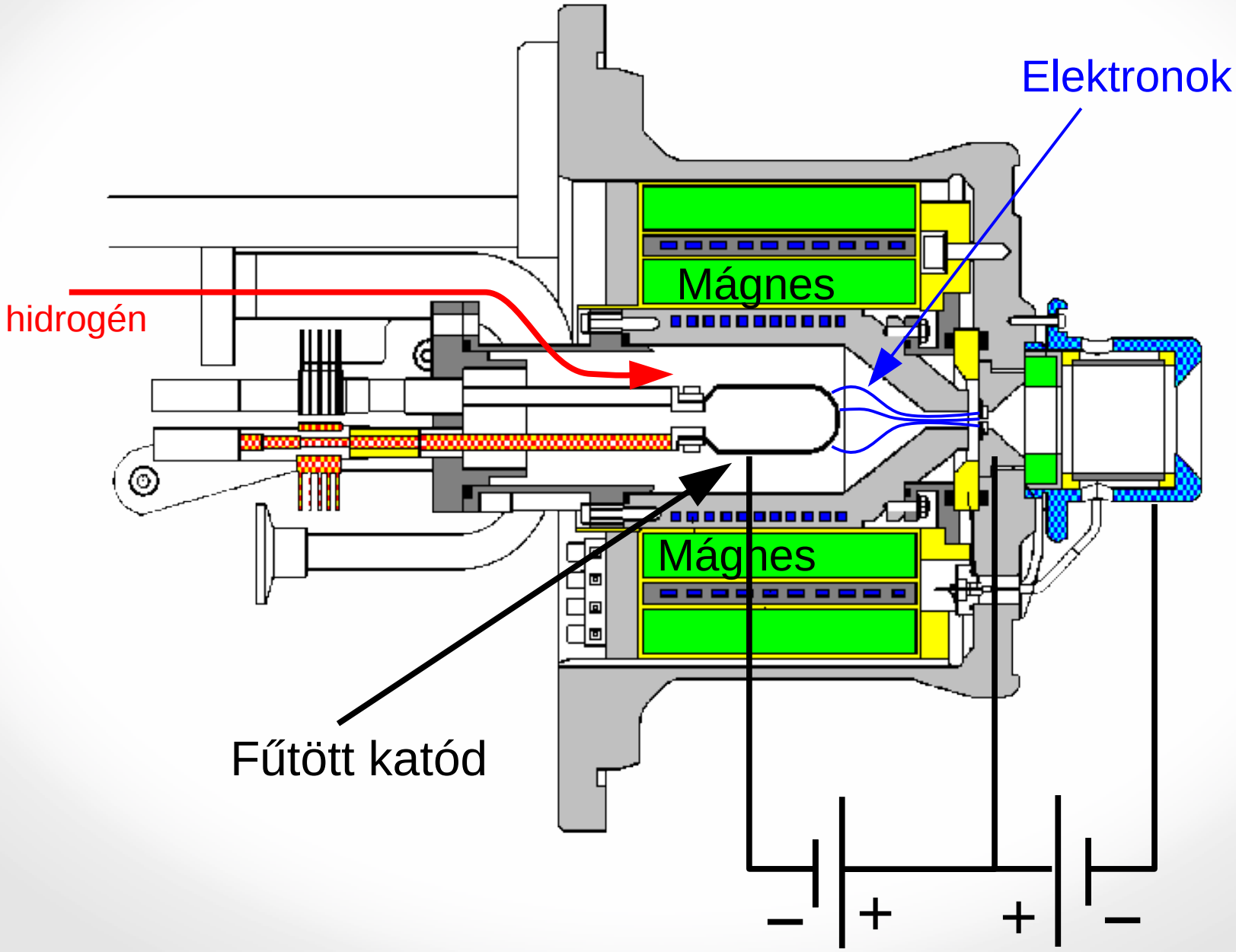
- ~ 10^{11} proton egy csomagban
- 2808 csomag kering egy irányban
- ~ 5 x 10^{14} proton van egyszerre a gyűrűben
- 10 óránként töltik újra a gyűrűt
- **10^{6} év alatt használ el (az LHC) 1 g hidrogént**
- A teljes CERN gyorsítókomplexum (más gyorsítók és kísérletek) összesen kb 50x ennyi hidrogént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

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

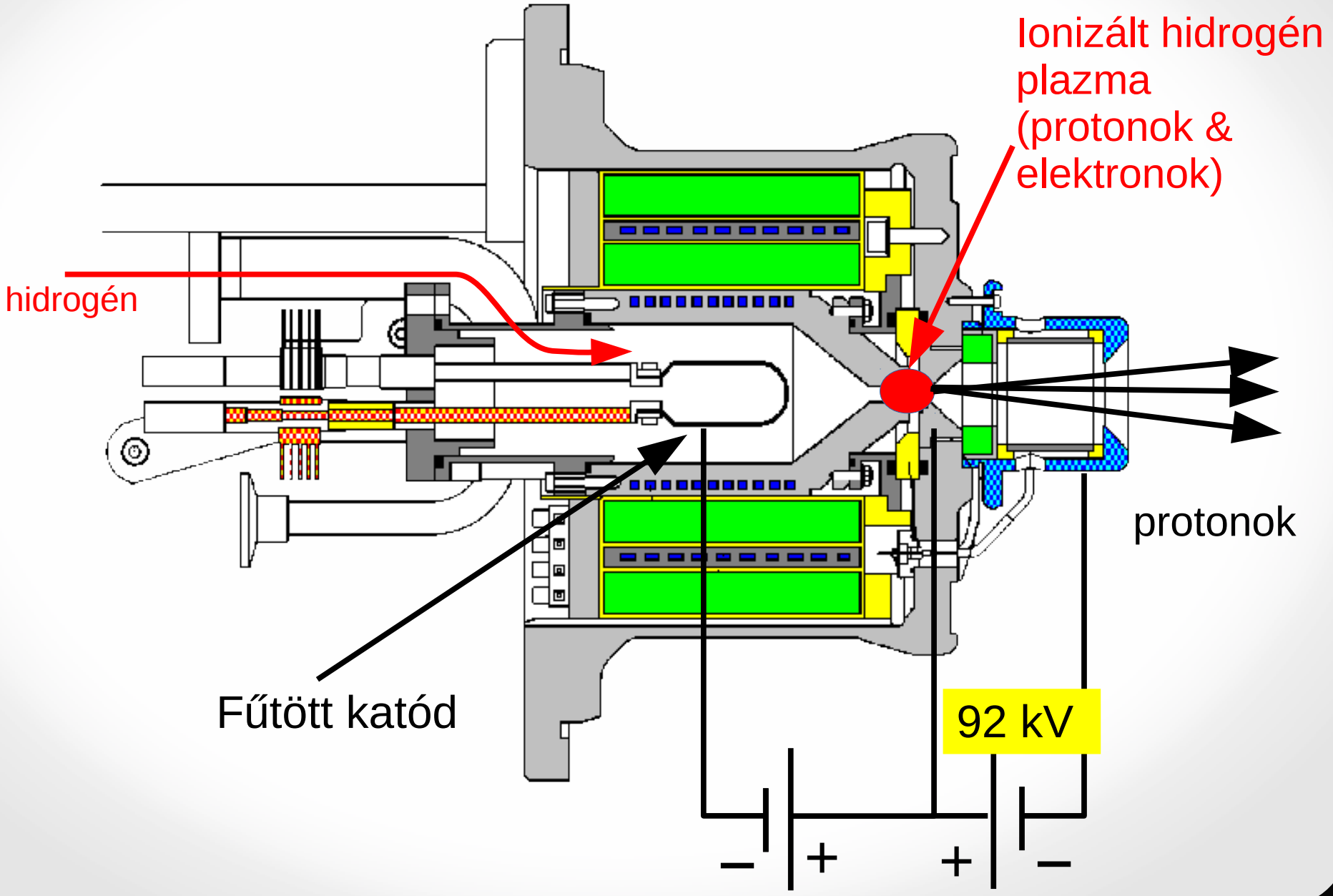
H_2-ből protonok?



H_2-ből protonok?

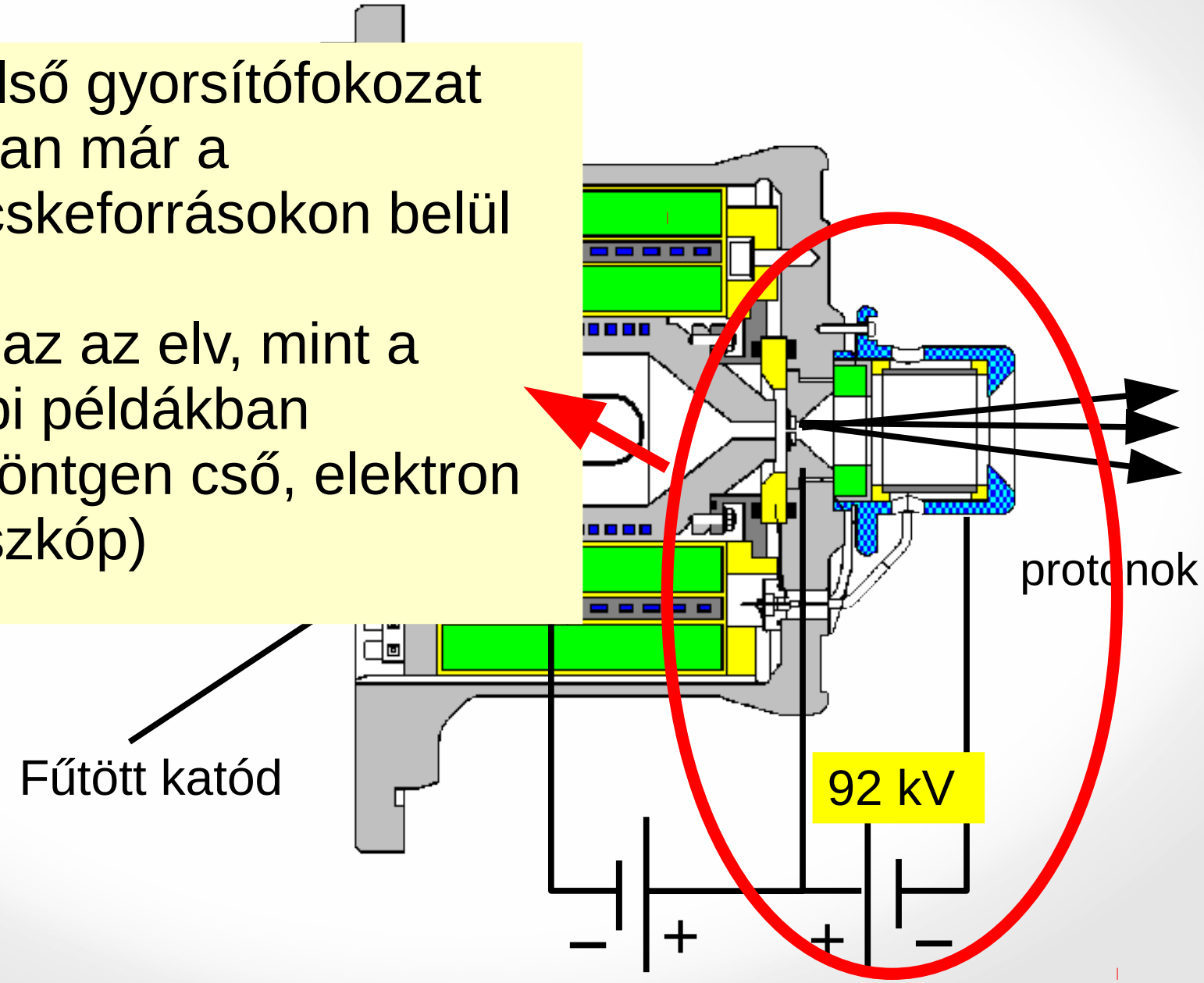


H_2-ből protonok?



H_2-ből protonok?

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



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

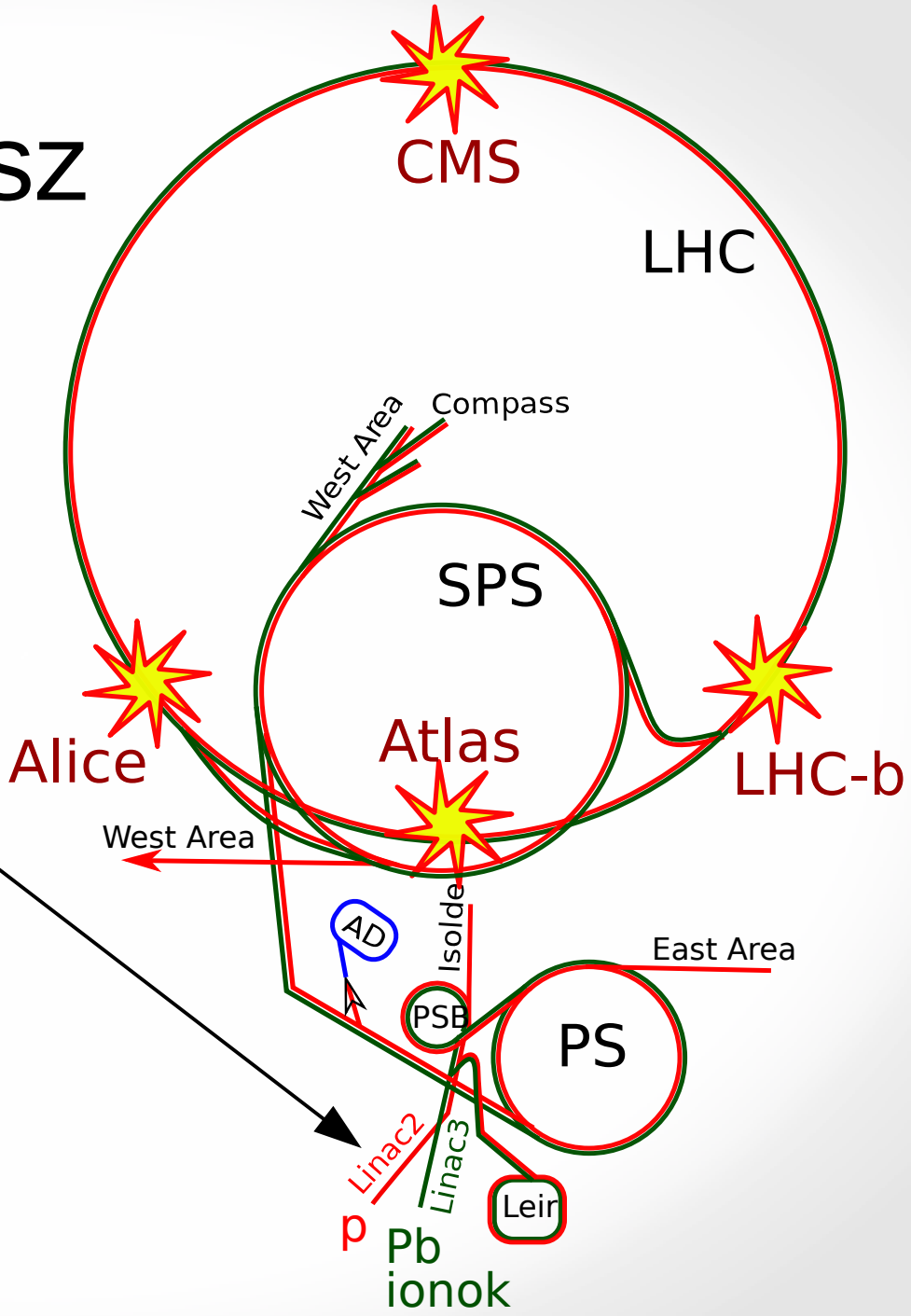
- (A fizika szertár nagyon hatásos eszköze egy Van de Graaff generátor!!!)

Magasabb energia – hogyan?

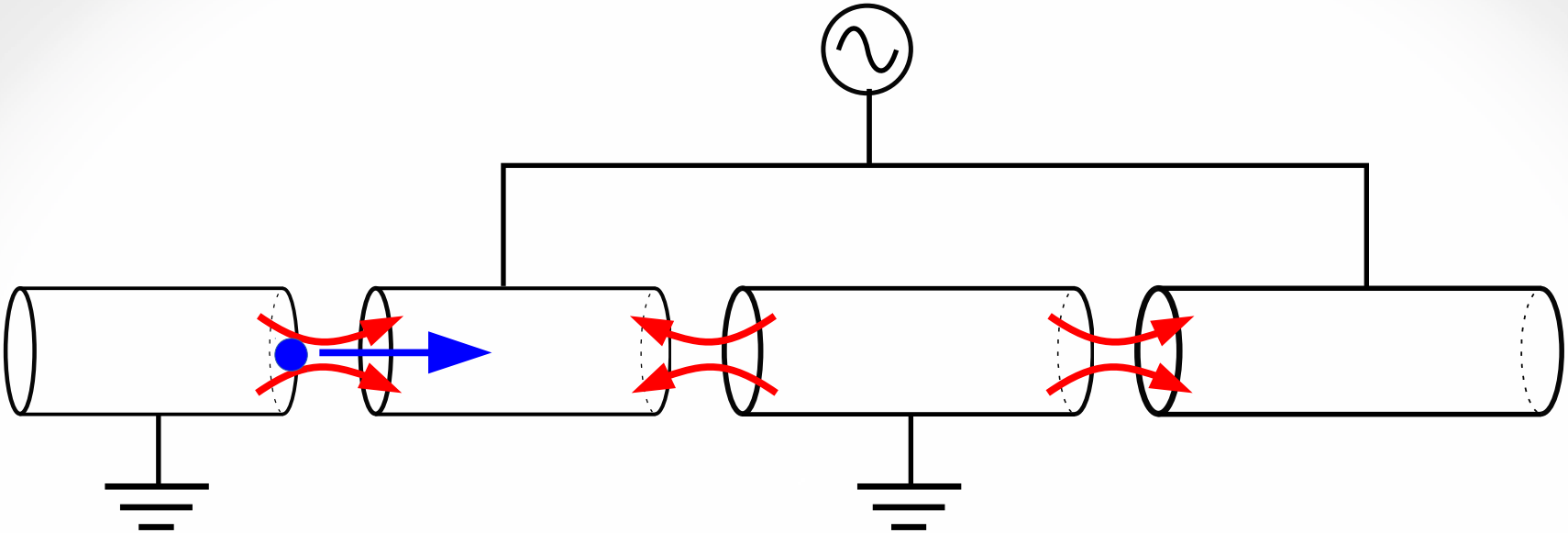
- Nem lehetne valahogyan többször felhasználni ugyanazt a teret? Minden áthaladásnál gyorsítana...
- NEM – az elektro**sztatikus** tér **konzervatív**, a részecske mozgási energiája kizárólag a helyének a függvénye, függetlenül attól, hogy milyen úton jutott oda.
- Ha az elektro**sztatikus** térrel ez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

A lineáris gyorsítószakasz

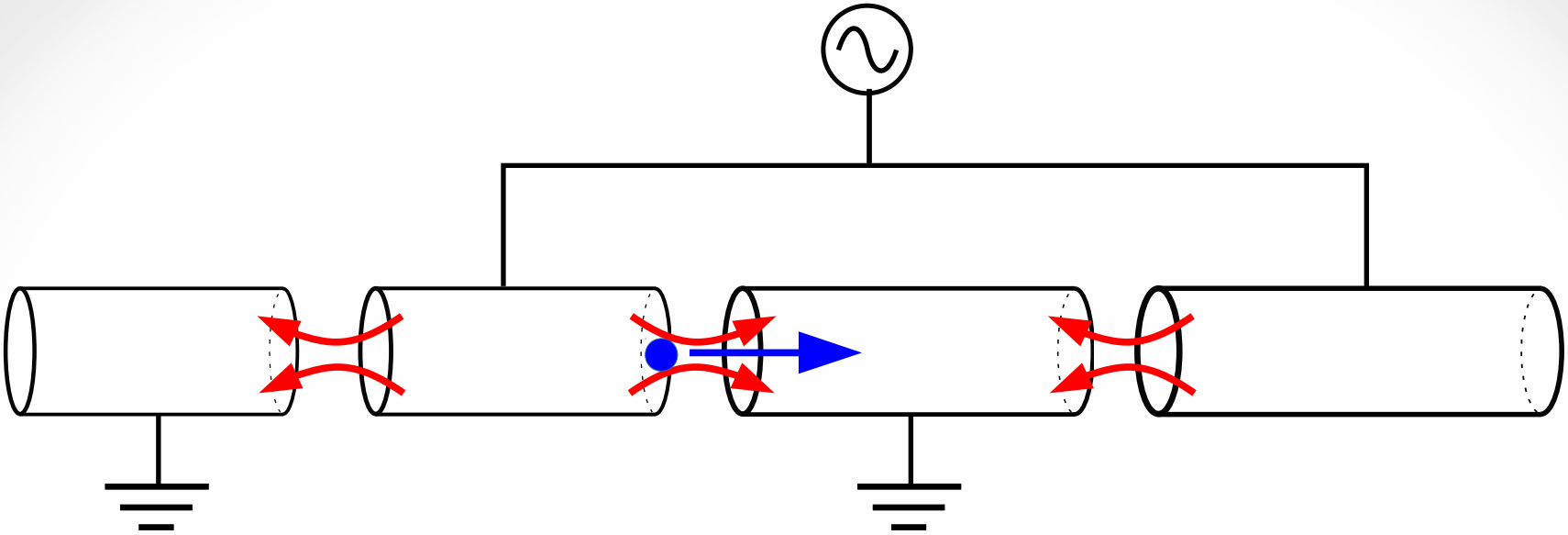
- **Lin**ear **Acc**elerator =Linac



Drift tube linac



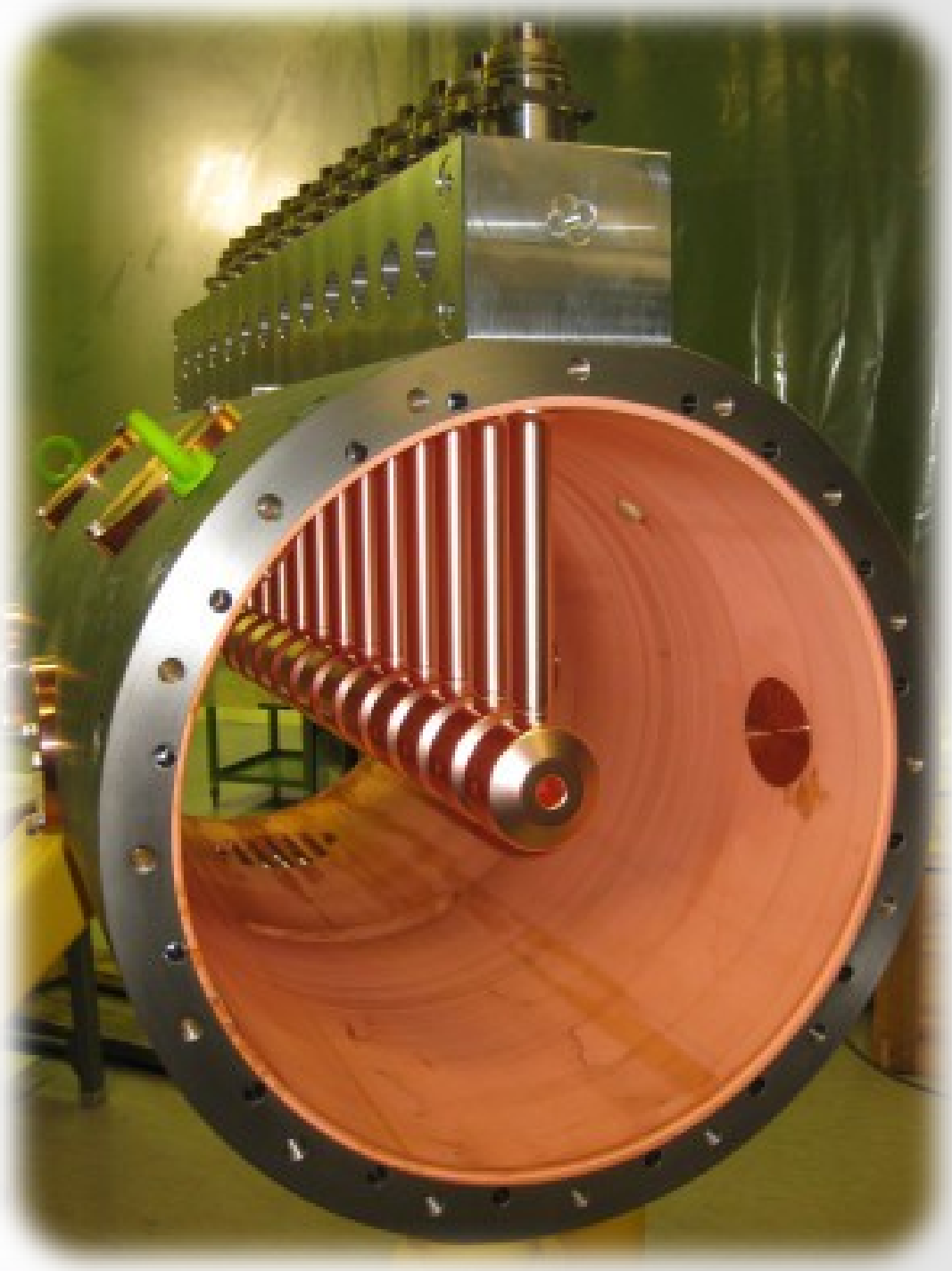
Drift tube linac



- 180^{o}-kal később az elektromos tér minden résben előjelet vált
- Megfelelő szinkron esetén a részecske mindig a gyorsító fázisban halad át a résen
- A részecskék csomagokban érkeznek – csak így lehetséges a szinkron.
- Ez a gyorsító tipikusan az első (lineáris) szakaszban található

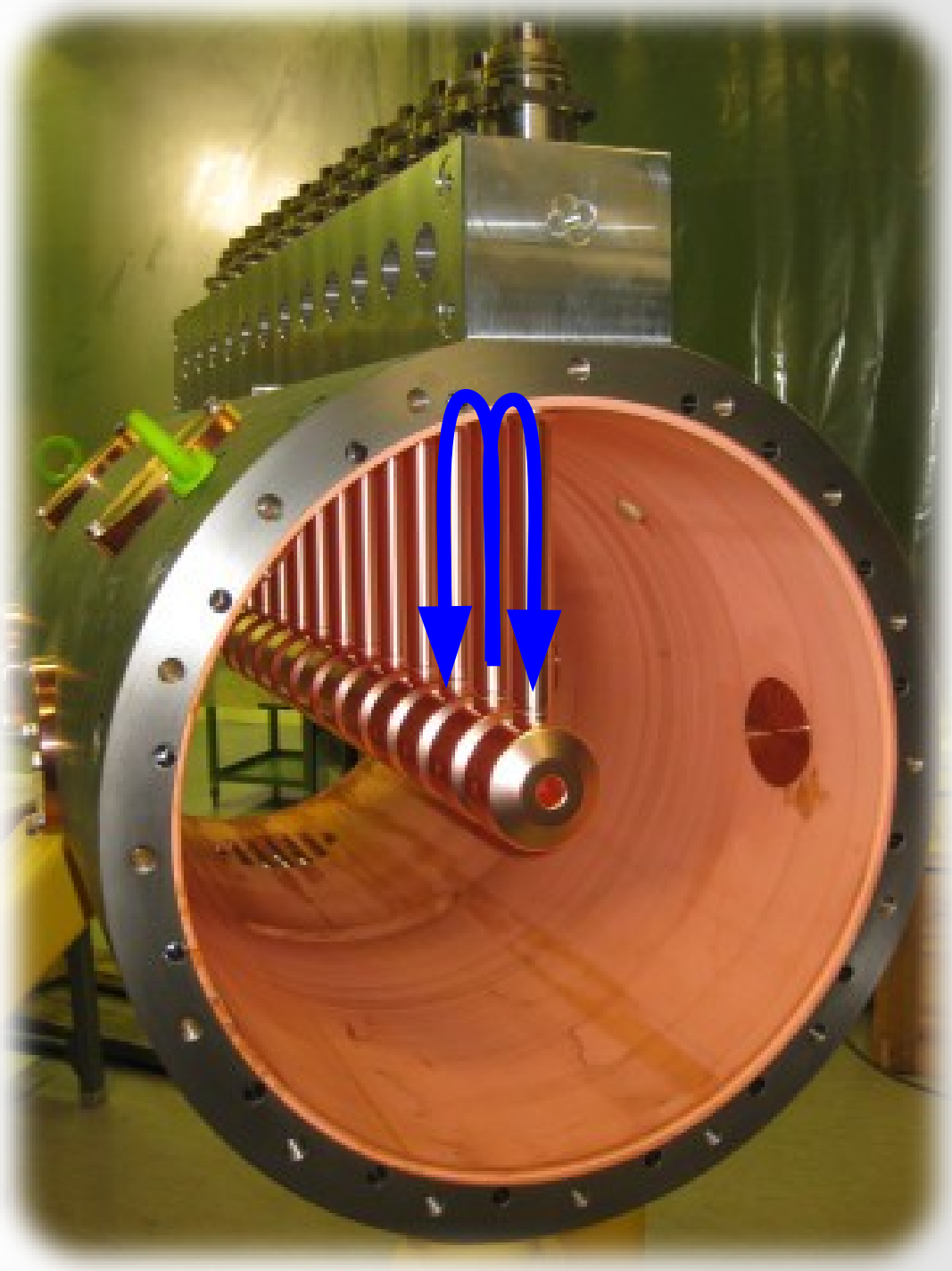
CERN Linac4 (a következő proton injektor)

- 50 MeV energia

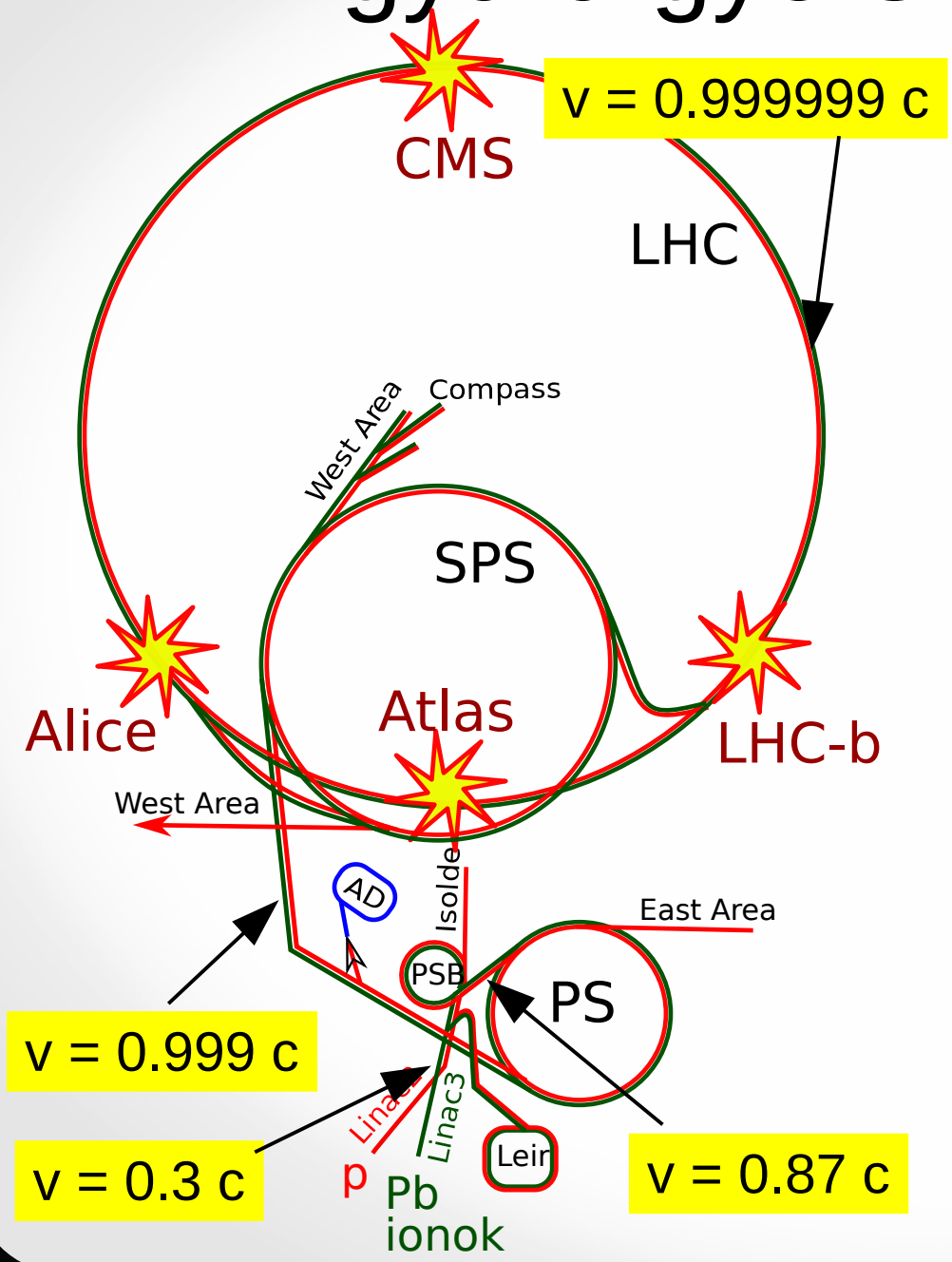


CERN Linac4 (a következő proton injektor)

- 50 MeV energia
- Zárt rádiófrekvenciás rezonátor
- (rezonátor = a tárolt energia két megjelenési forma között oszcillál: elektromos-mágneses)
- pl. inga: helyzeti és mozgási energia



A gyűrű gyorsítószakasz(ok)



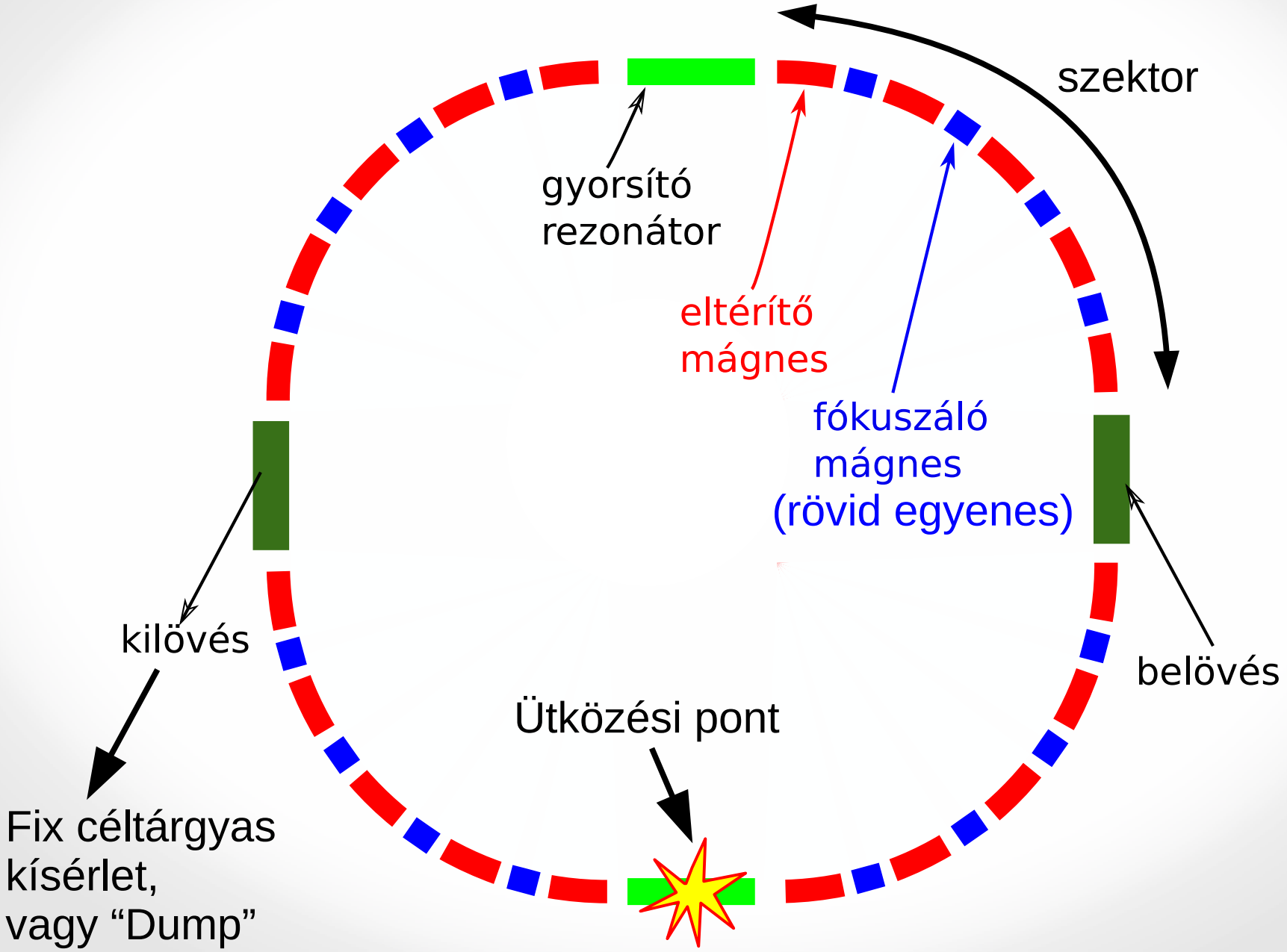
Miért gyűrű?

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

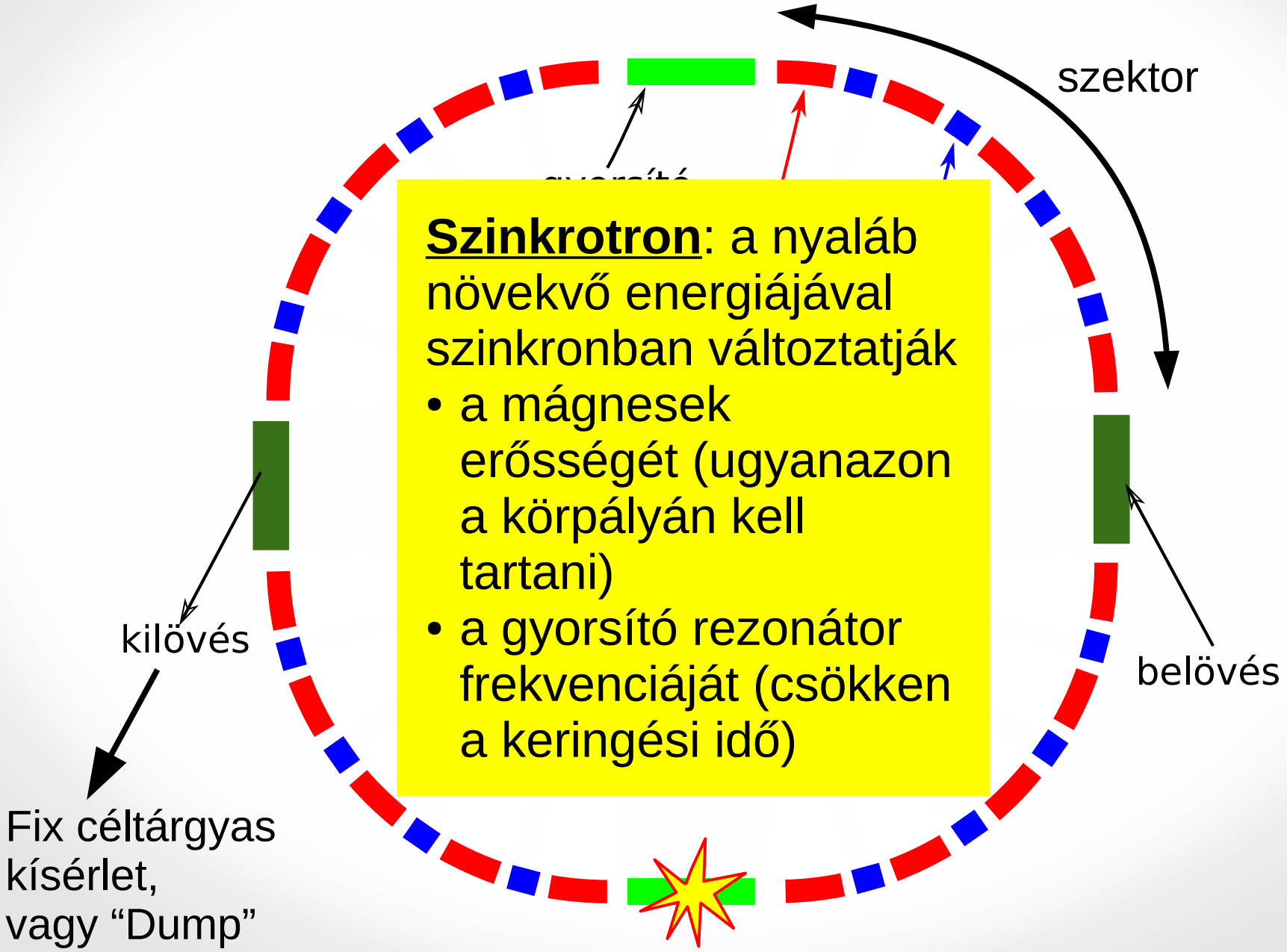
Miért több gyűrű?

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

A gyűrű gyorsítószakasz



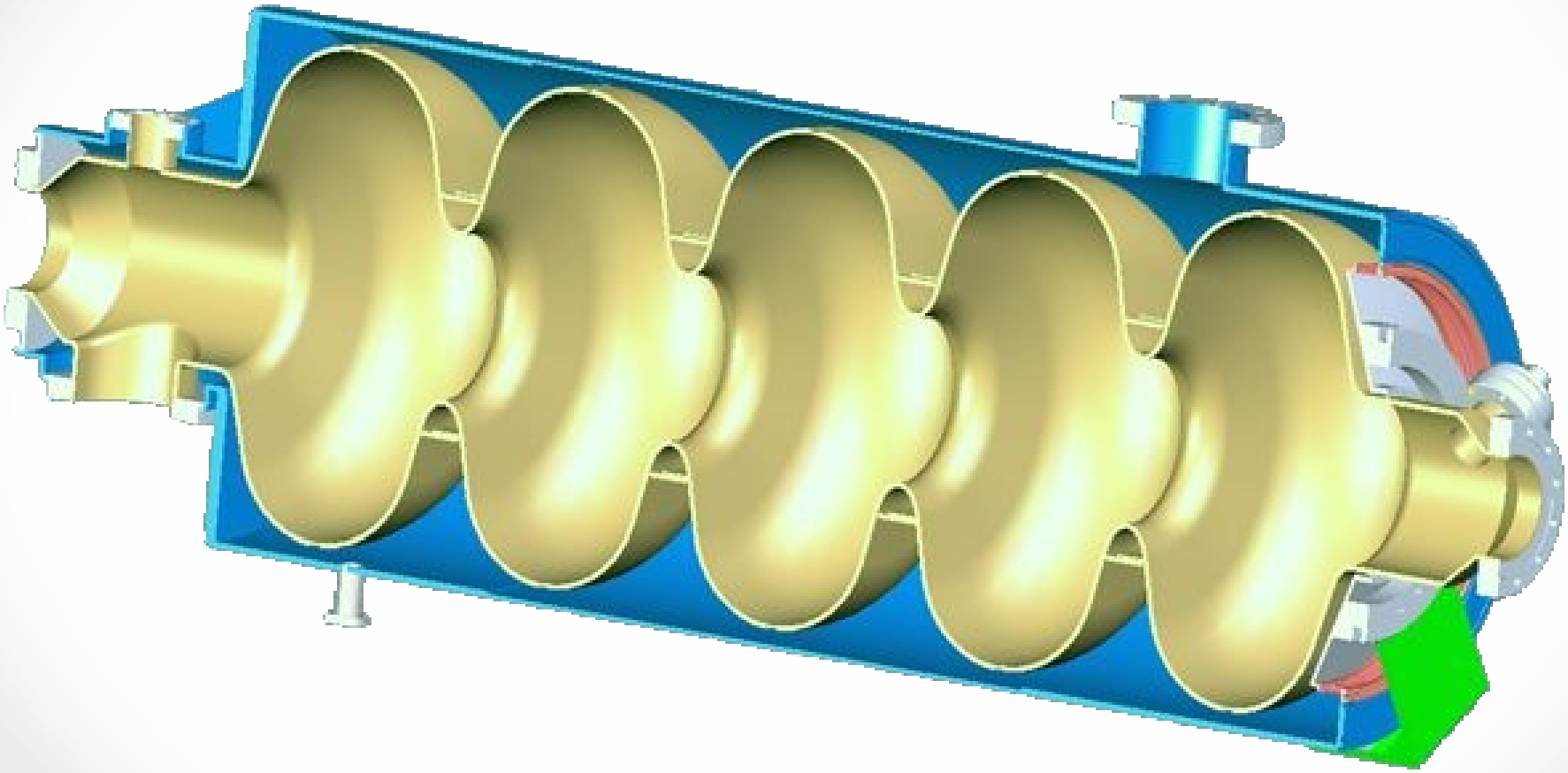
A gyűrű gyorsítószakasz



Szinkrotron: a nyaláb növekvő energiájával szinkronban változtatják

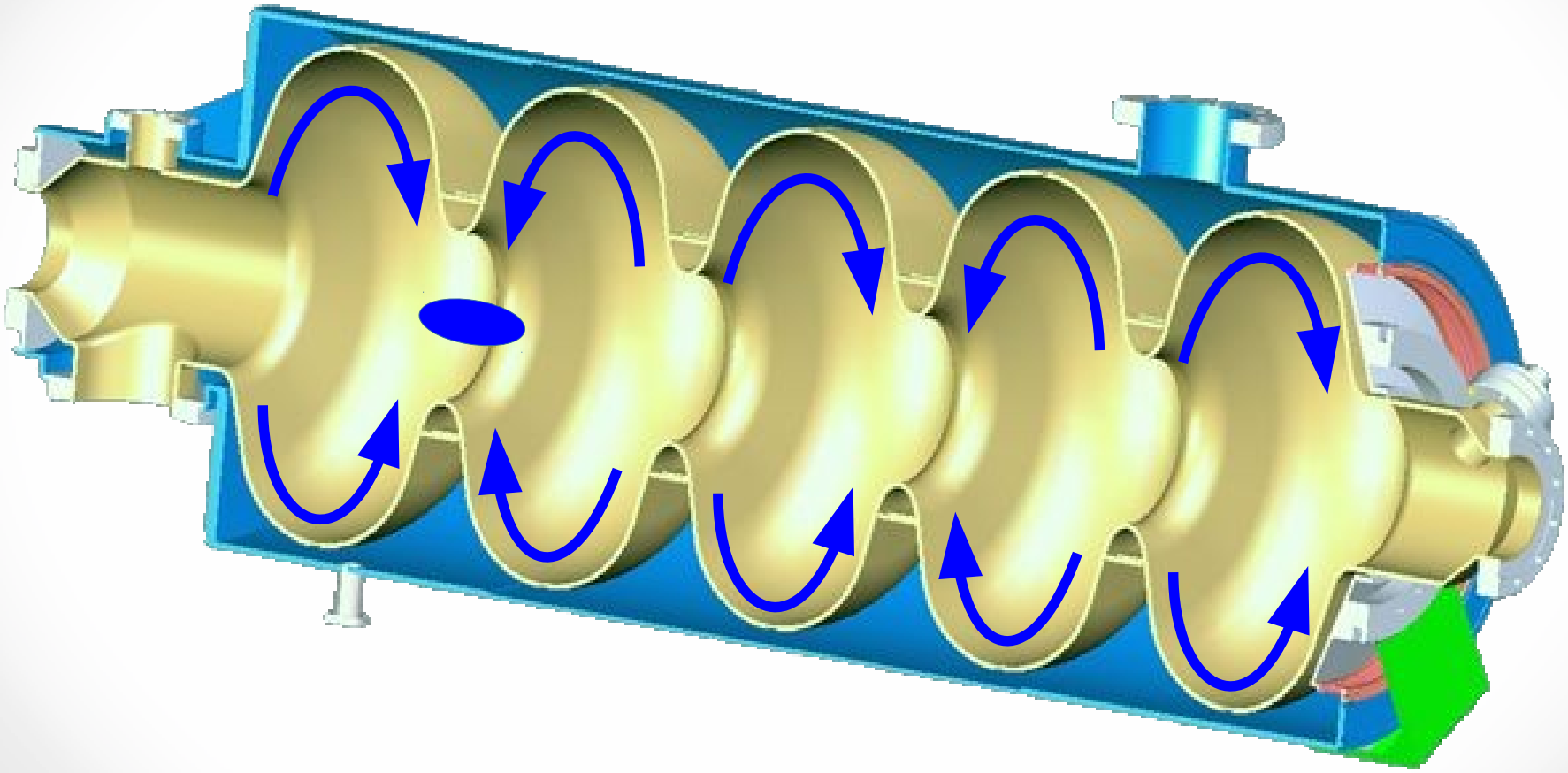
- a mágnesek erősségét (ugyanazon a körpályán kell tartani)
- a gyorsító rezonátor frekvenciáját (csökken a keringési idő)

Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban

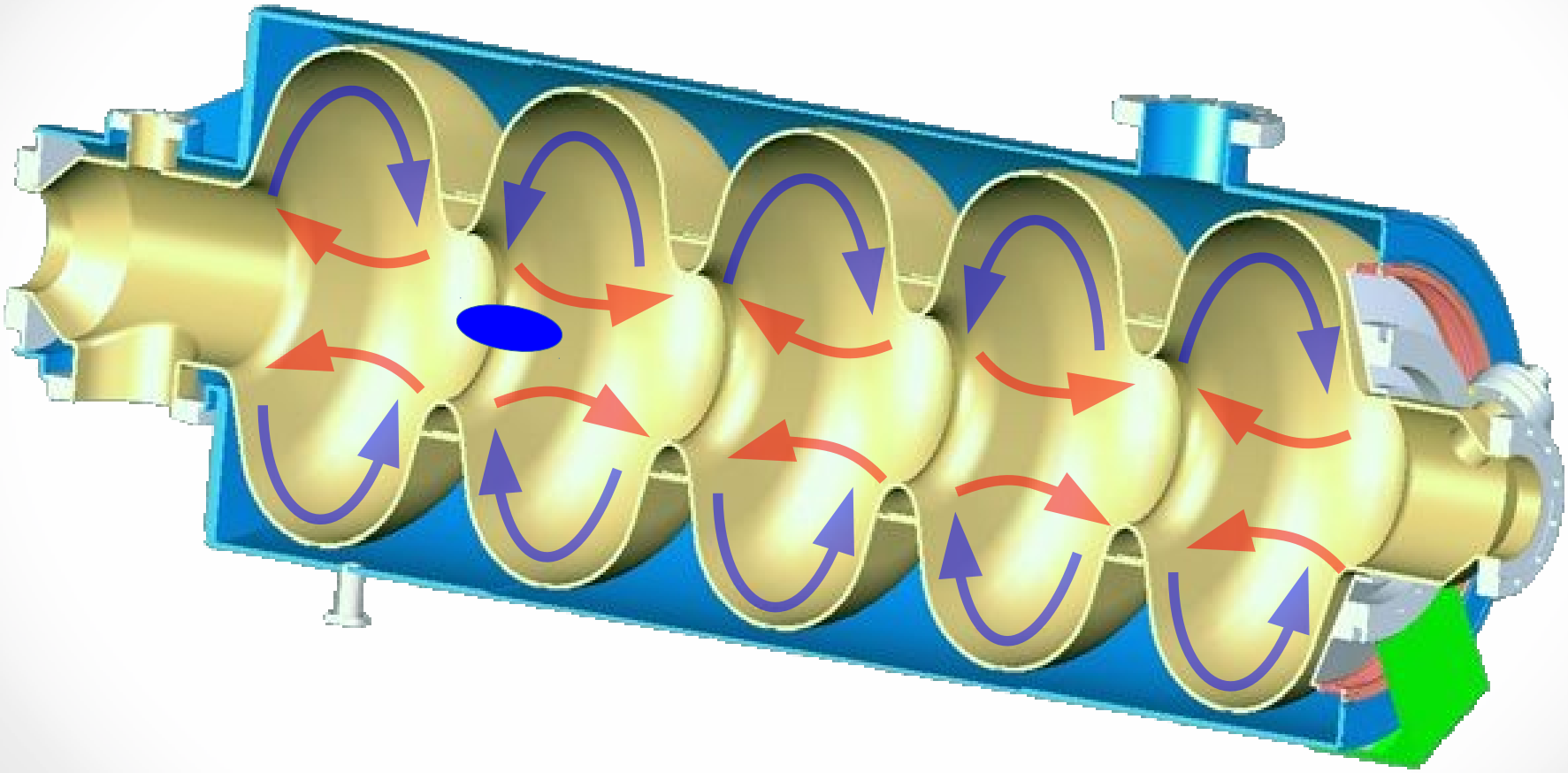


Többcellás rezonátor
Réz vagy szupravezető (niobium)

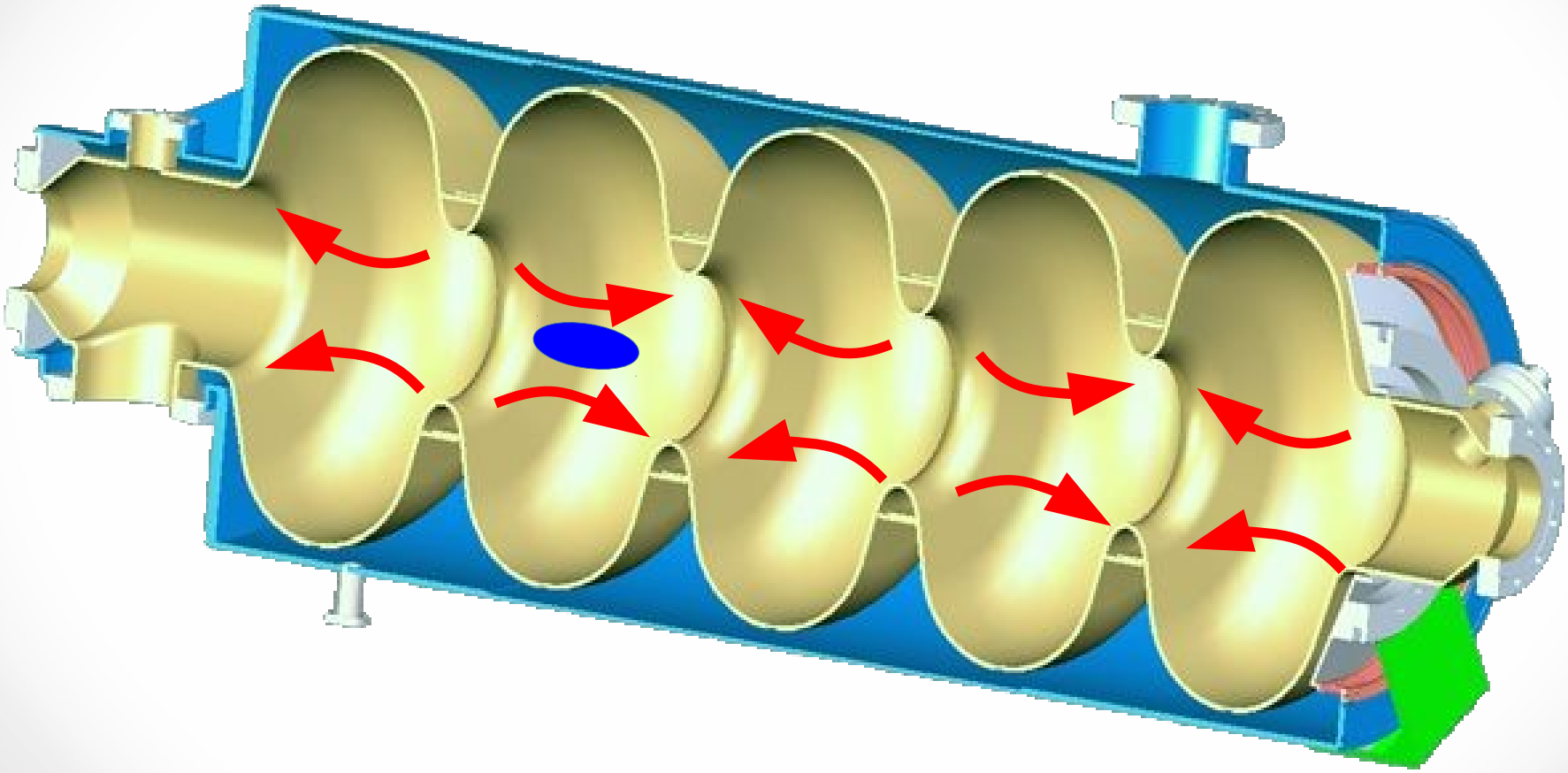
Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban



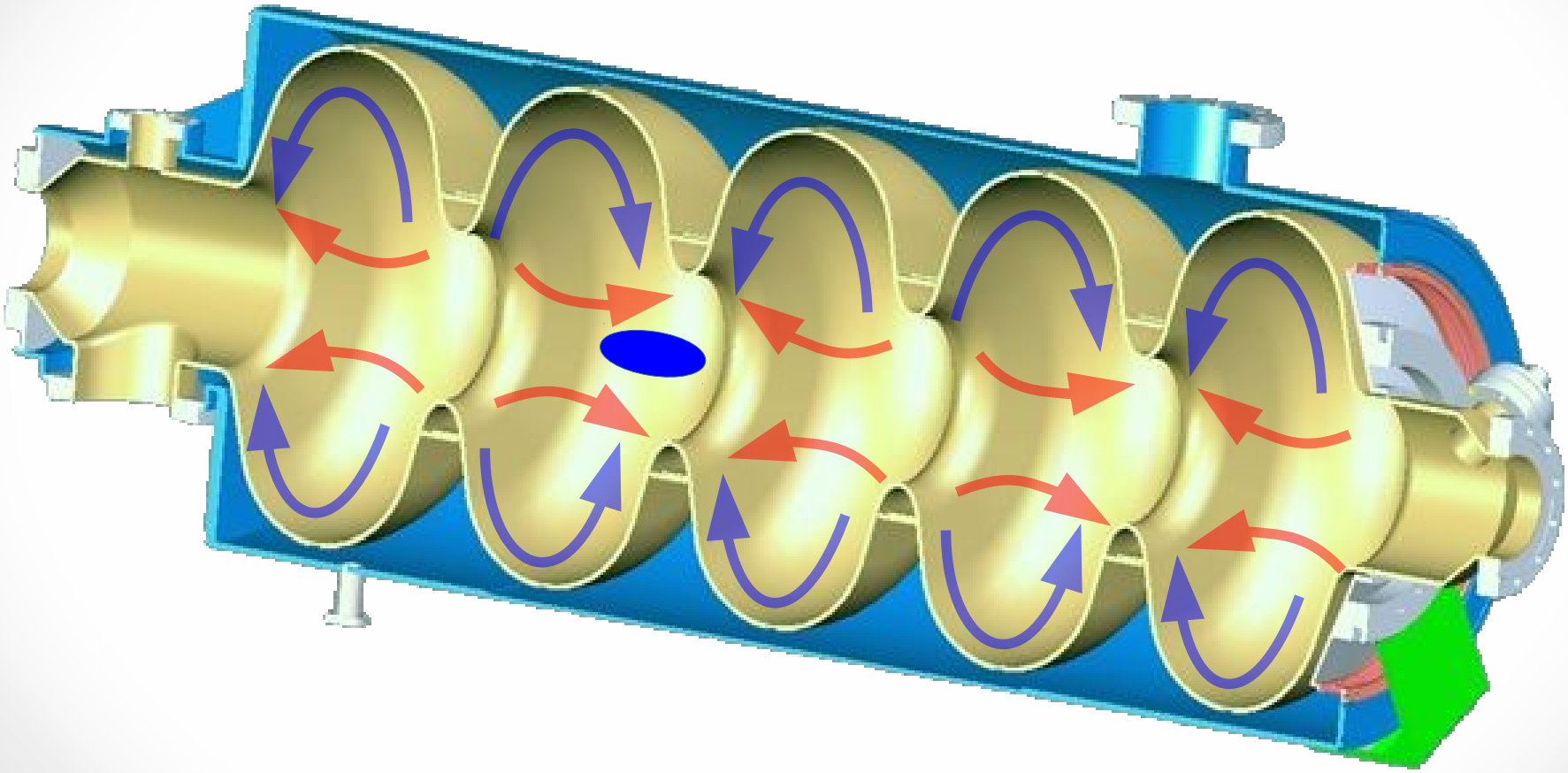
Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban



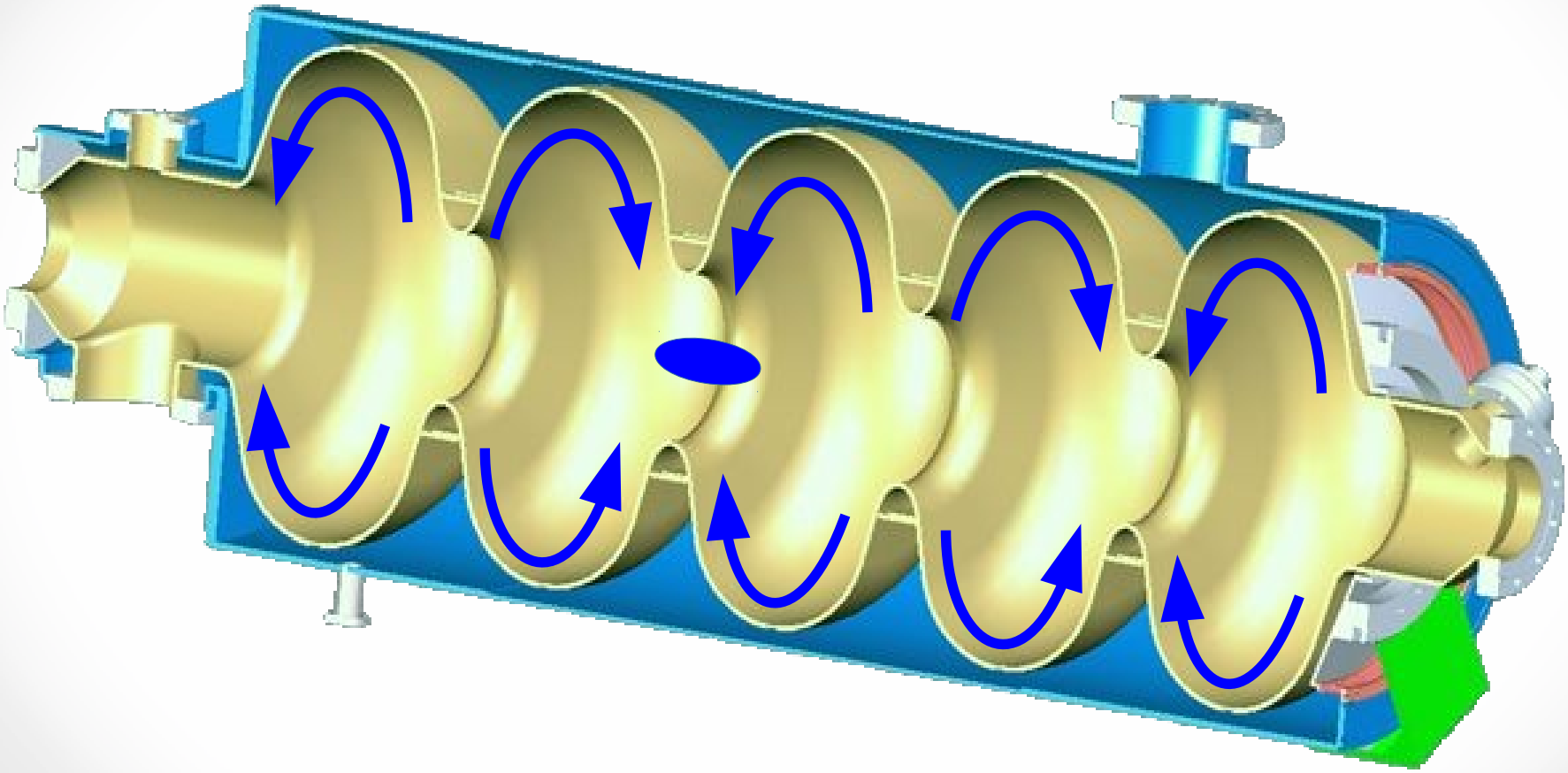
Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban



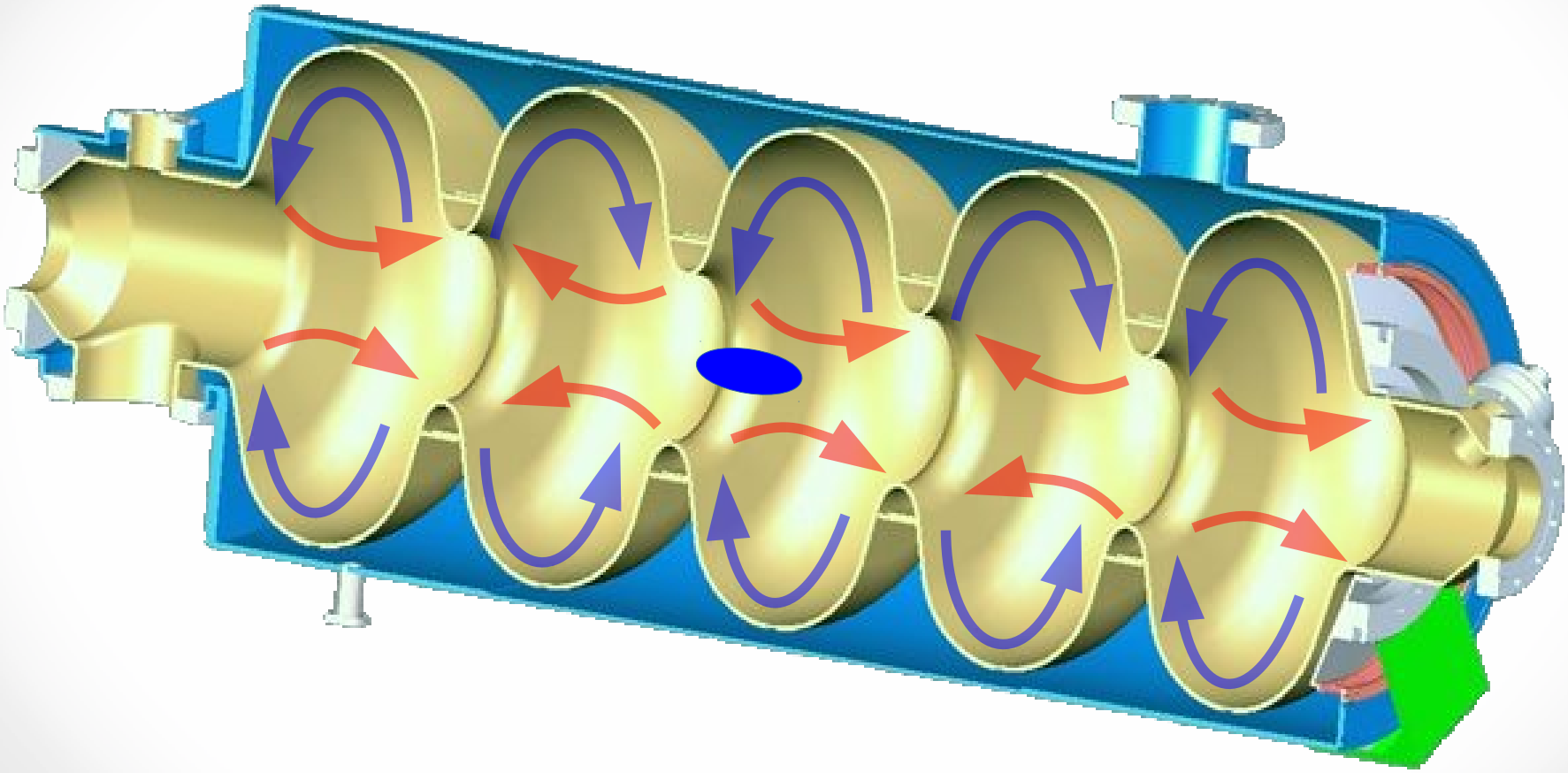
Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban



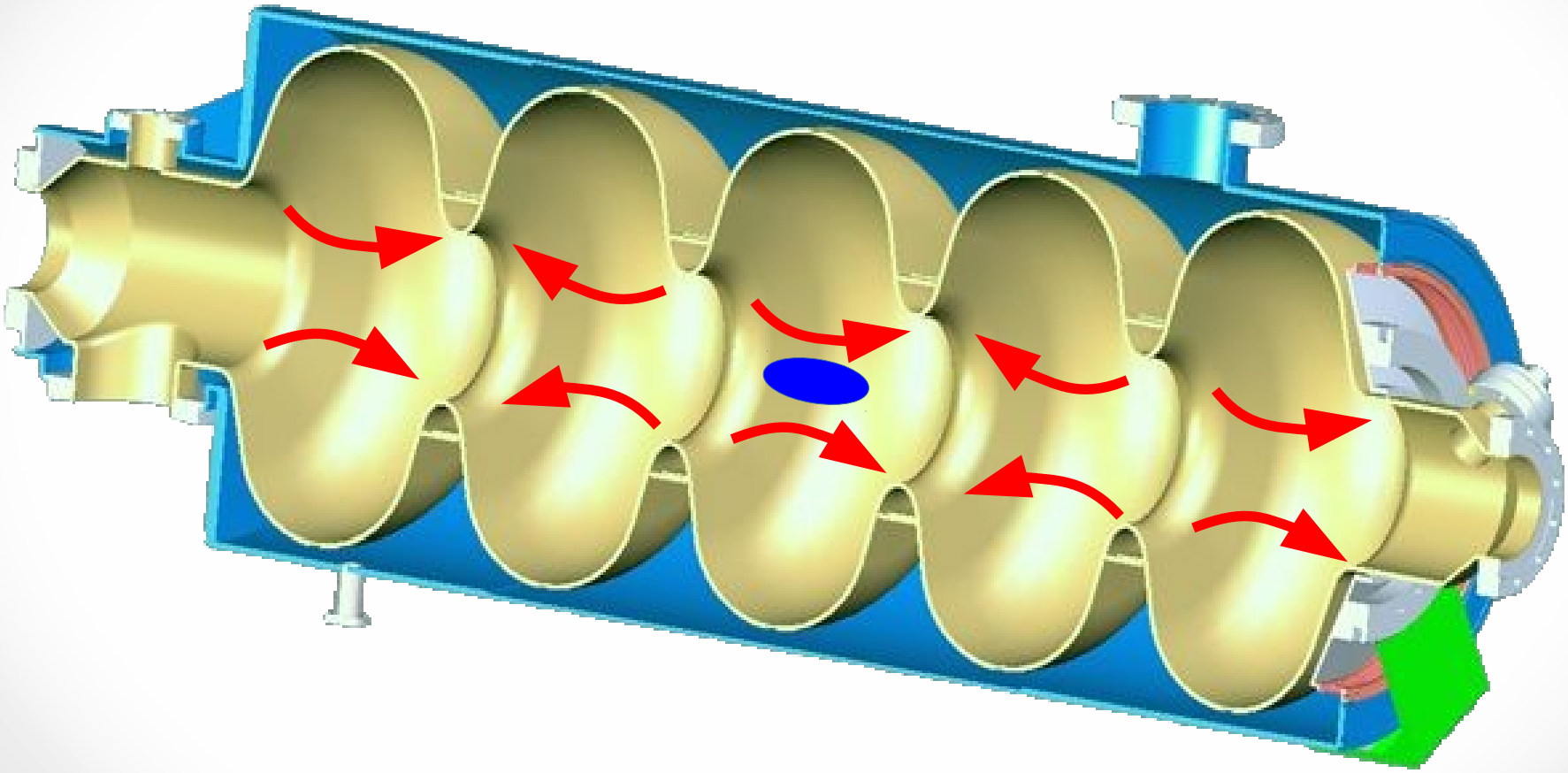
Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban



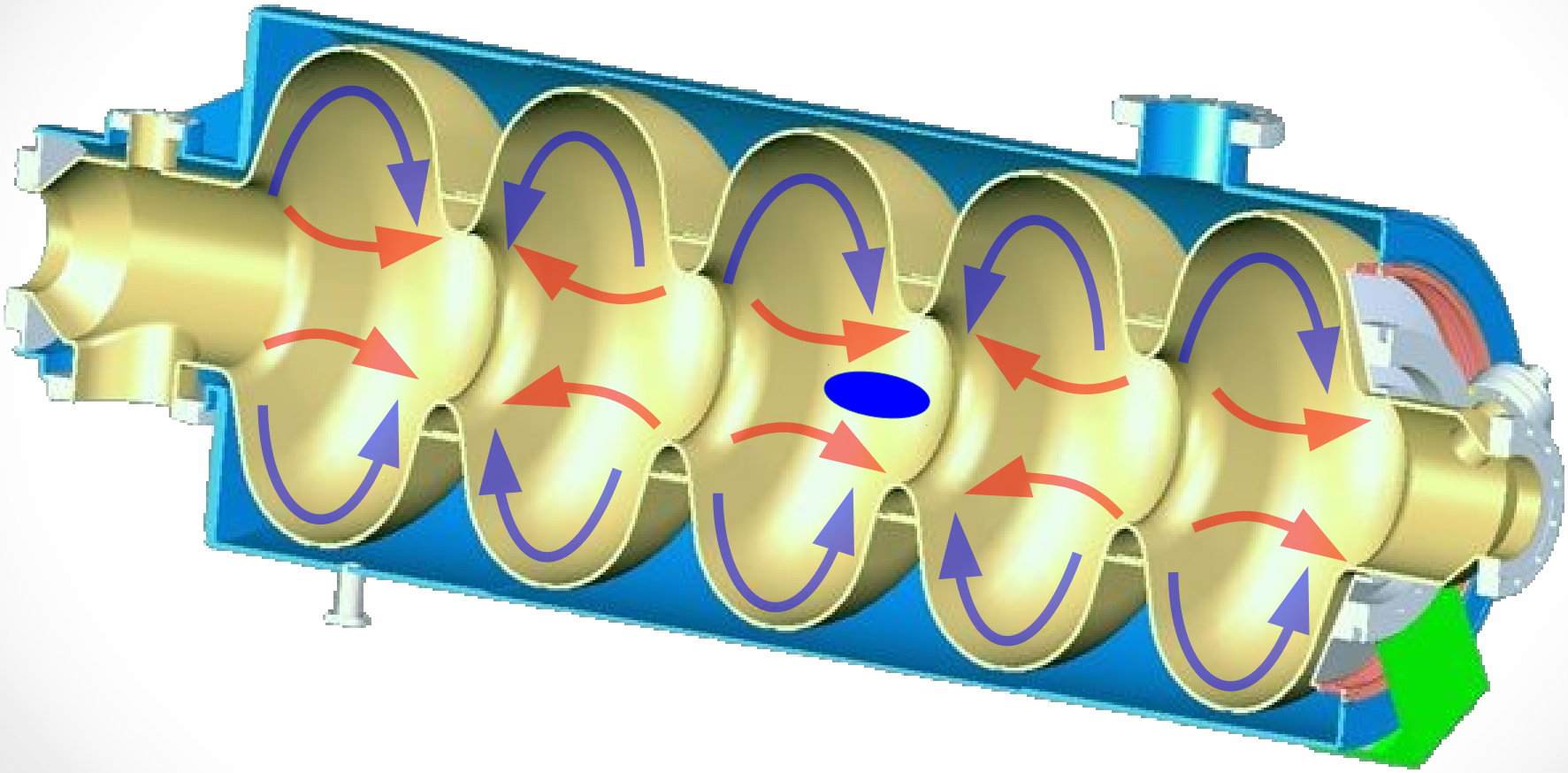
Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban



Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban

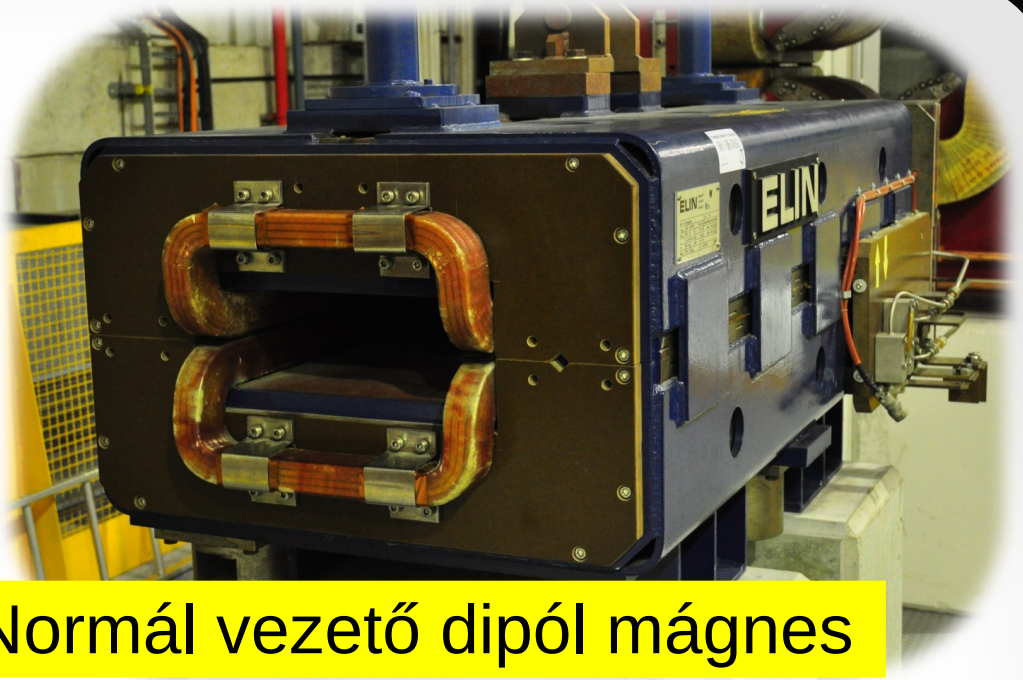


Gyorsító rezonátor – az egyenes szakaszokban

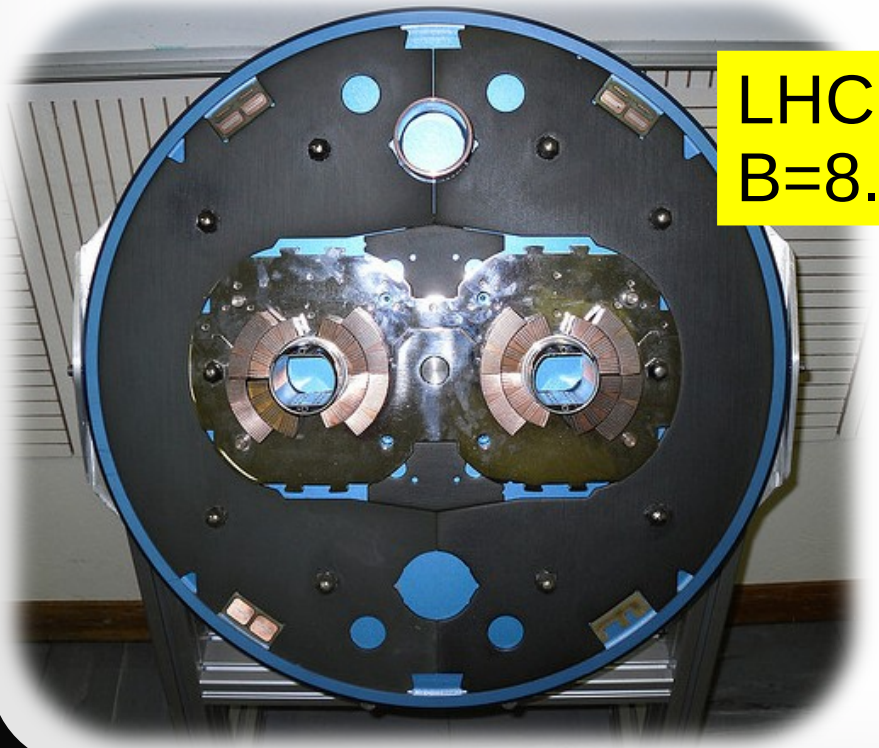


Eltérítő mágnesek

Cél: homogén mágneses teret létrehozni



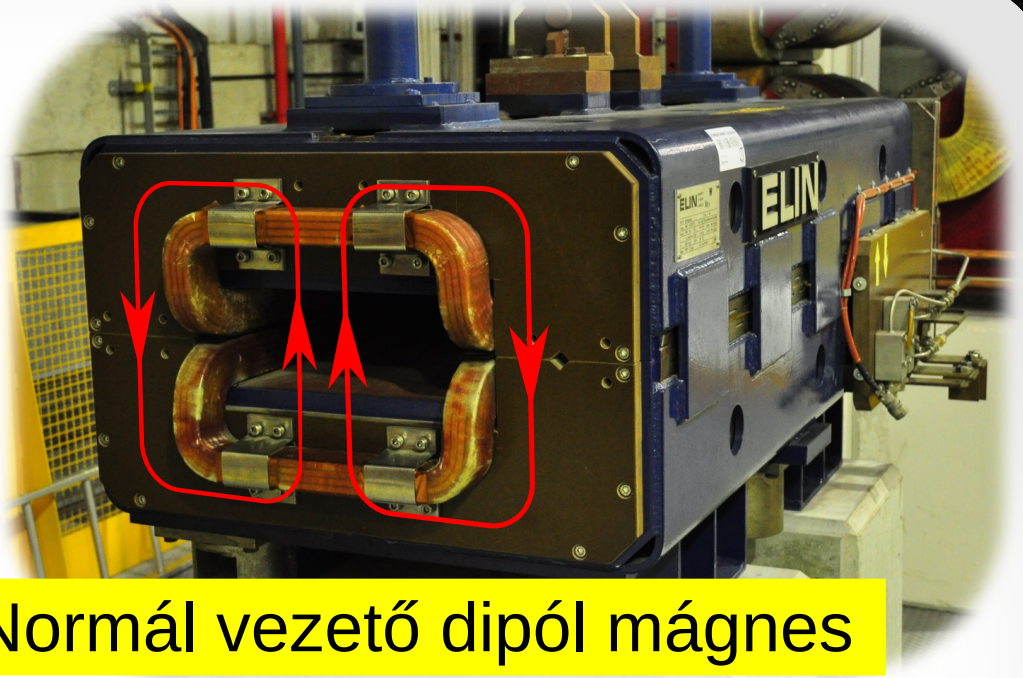
Normál vezető dipól mágnes



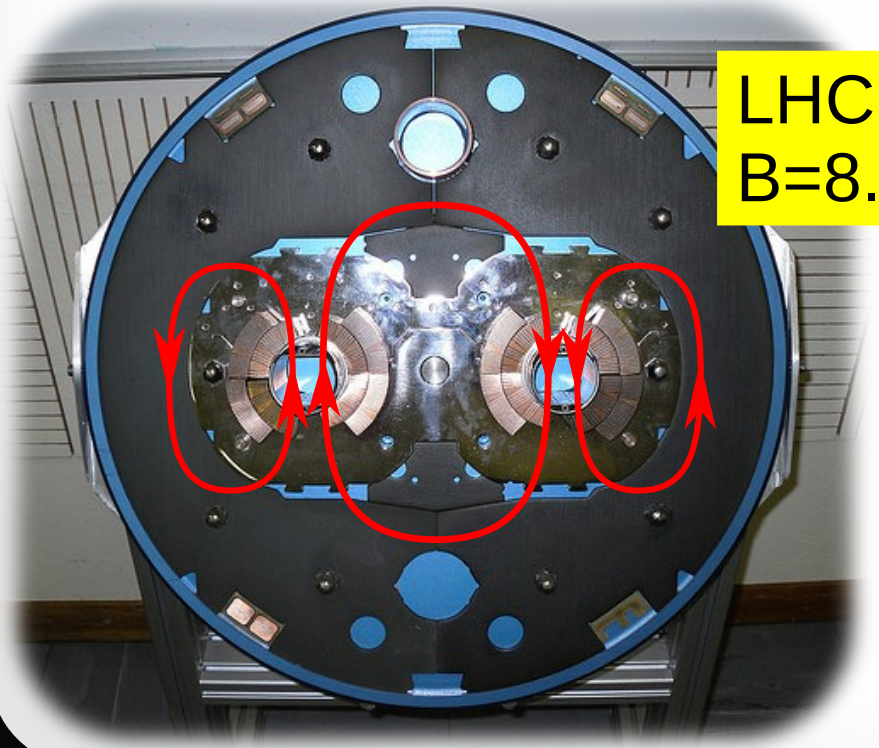
LHC szupravezető mágnesei
B=8.4 Tesla, T=1.9 Kelvin

Eltérítő mágnesek

Cél: homogén mágneses teret létrehozni



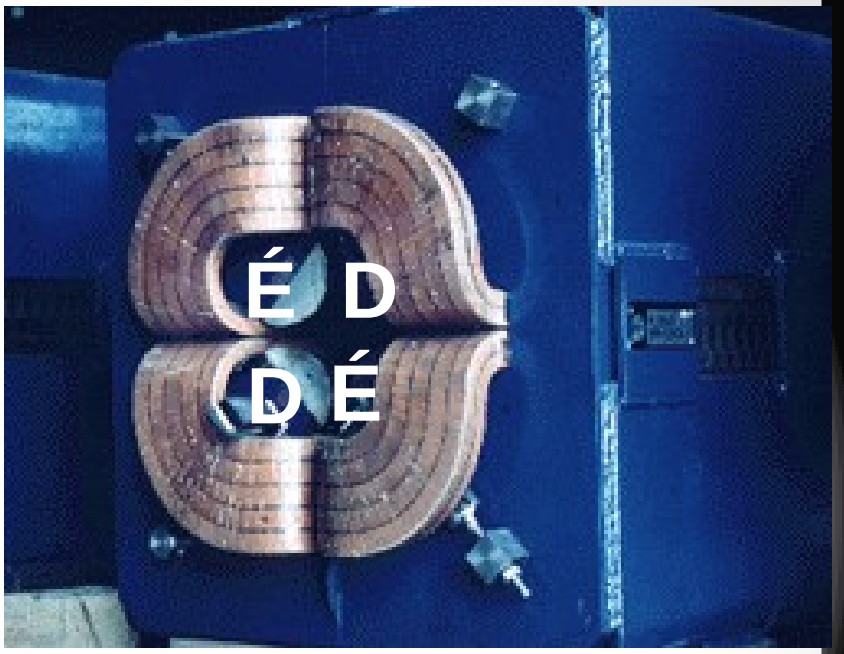
Normál vezető dipól mágnes

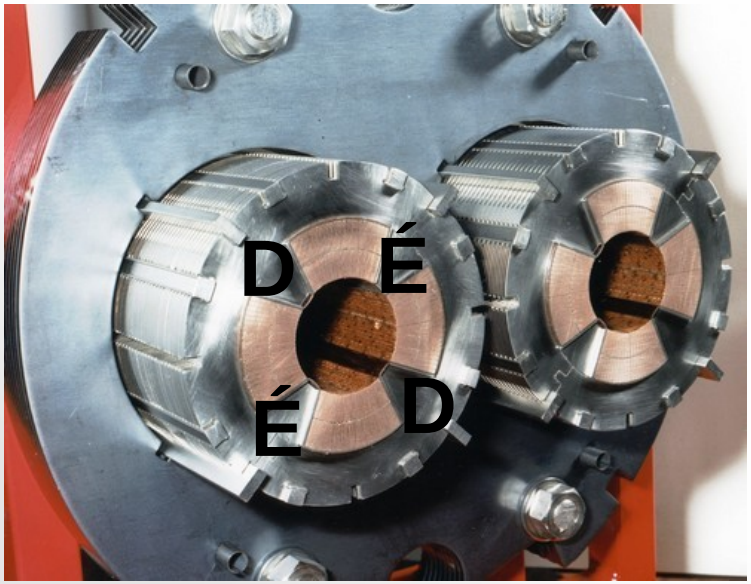


LHC szupravezető mágnesei
B=8.4 Tesla, T=1.9 Kelvin

Fókuszáló mágnesek – az egyenes szakaszokban

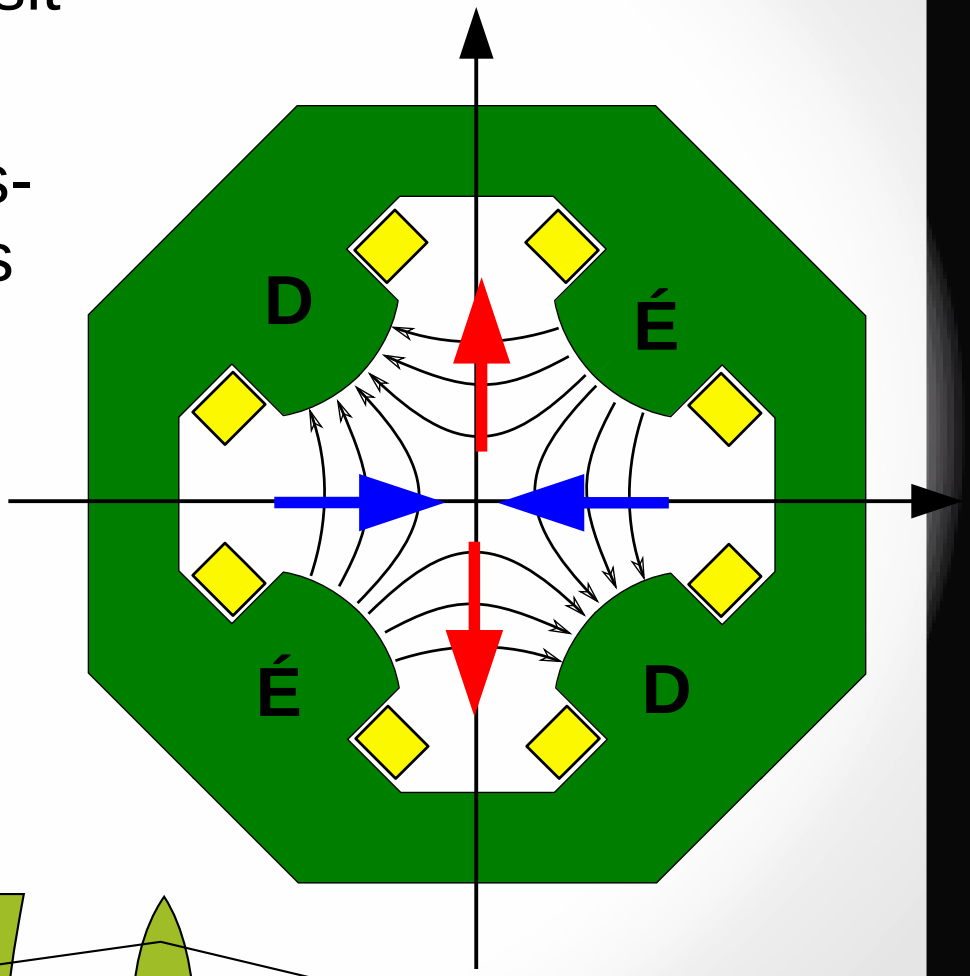
- Egy valódi nyalábban mindig kicsit széttartó részecskék vannak
- Az ideális pályától eltérő részecskéket vissza kell téríteni a helyes nyomvonalra

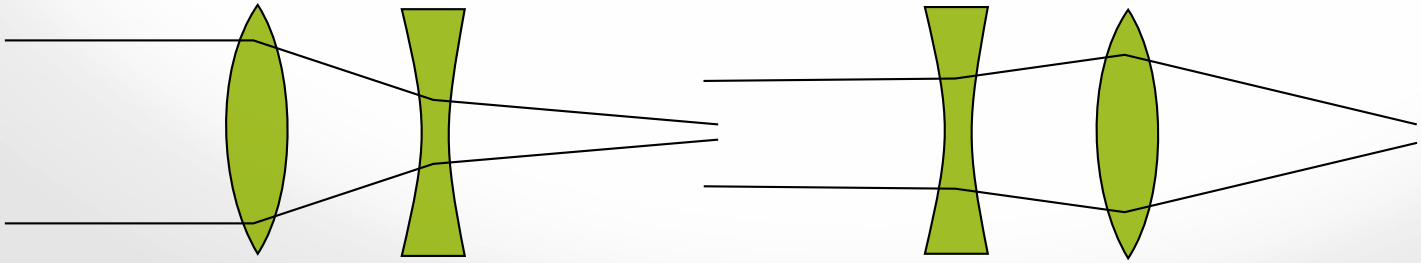




Fókuszáló mágnesek – az egyenes szakaszokban

- 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):



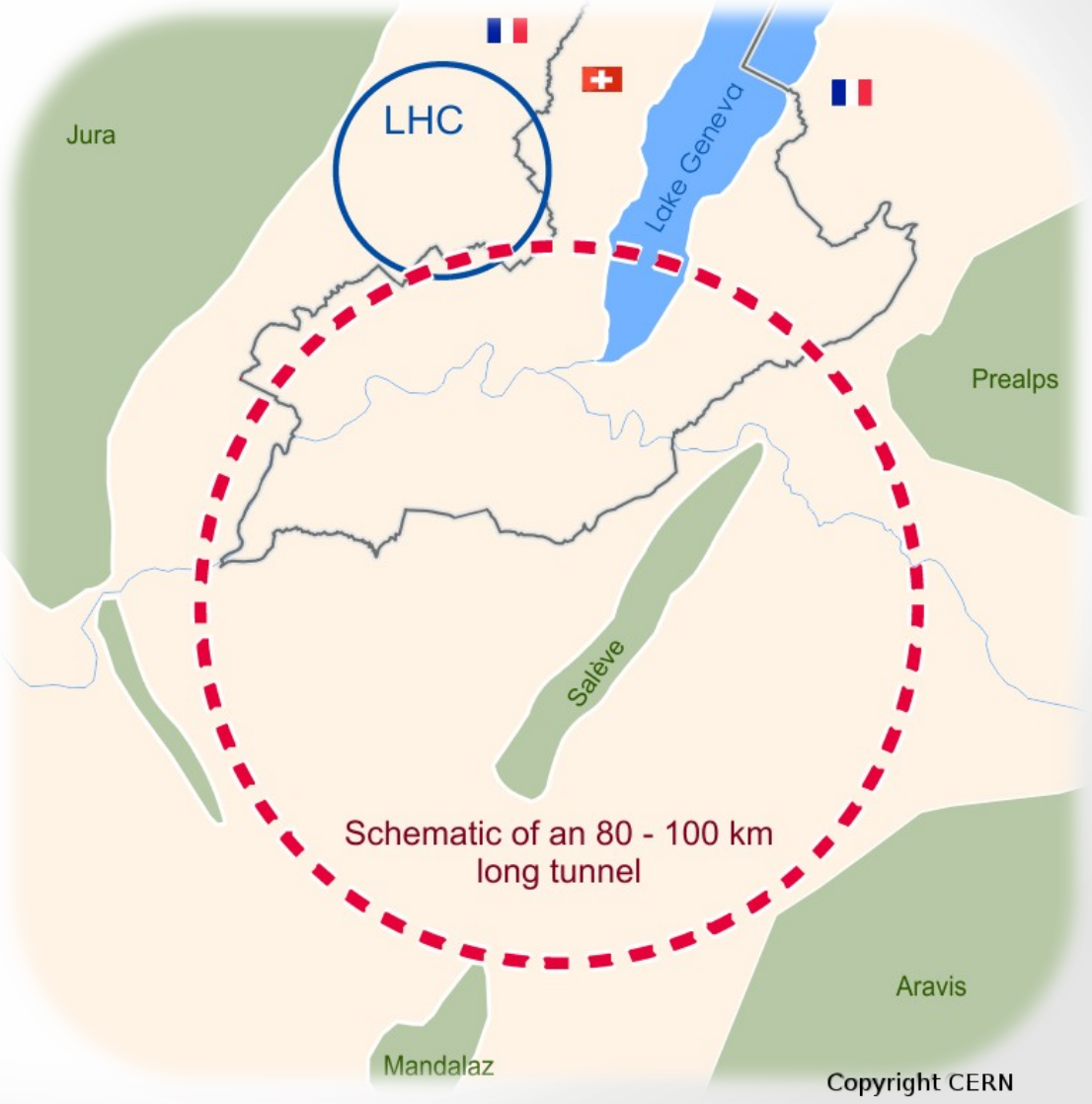


Részecskegyorsítók felhasználása világszerte

- Világszerte kb. 26000 részecskegyorsító üzemel
- 44% sugárterápiás kezelés (60-250 MeV)
- 41% ion implantáció (~ 100 keV nagyságrend), pl
  - félvezető gyártás
  - fém felületkezelés (pl nitrogén implantáció) késekbe, fúróhegyekbe
- 9% ipari alkalmazás, kutatás
- 4% orvosbiológiai alkalmazás, kutatás
- 1% orvosi rádióizotóp gyártás
- 1% nagyenergiás (>1 GeV) fizika
  - Energia világcsúcstartó: LHC 14 TeV (7+7 TeV)

Kitekintés: FCC (CERN)

- FCC – Future Circular Collider
- Az LHC-t injektorként (előgyorsítóként) használva, 100 km kerületű, 100 TeV ütközési energiájú proton-proton ütköztető

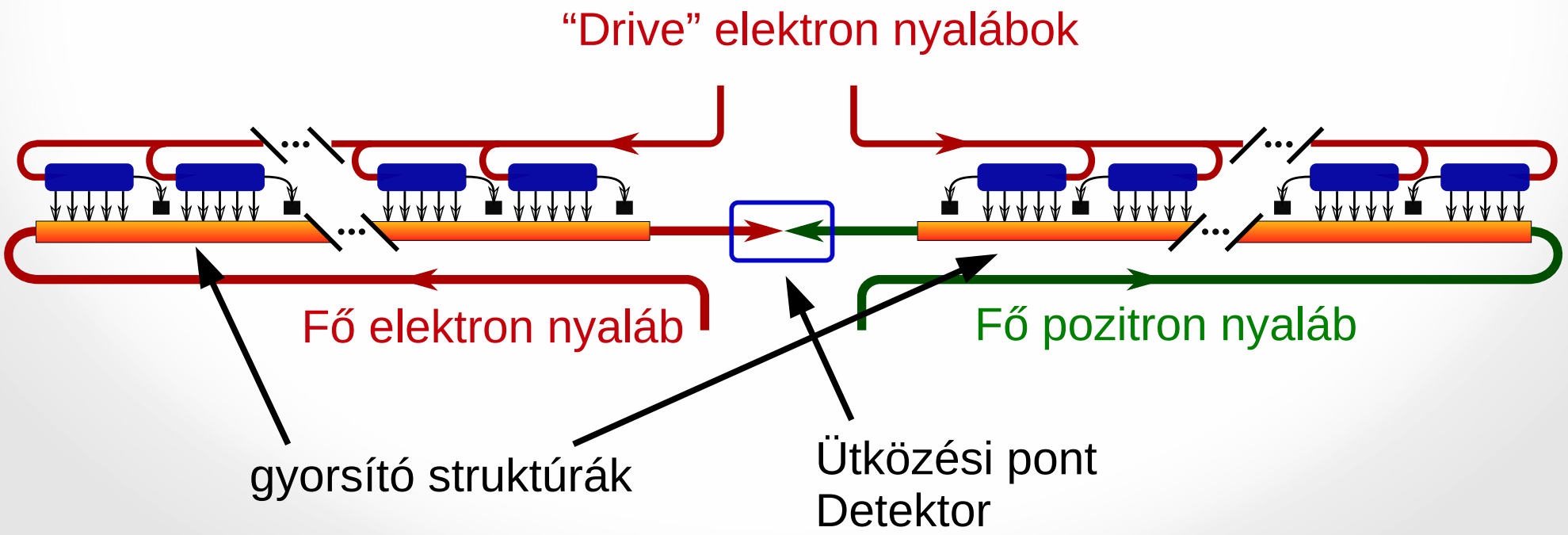


Kitekintés: Kínai super proton collider

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

Kitekintés: CLIC

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



Kitekintés: ILC

- International Linear Collider
- Lineáris elektron-pozitron ütköztető
- 500 GeV ütközési energia, 31 km hossz

Összefoglalás

- Akár a mindennapokban is találkozhatunk “részecskegyorsítókkal”, amik ugyanazokat az elveket használják, mint az “igazi” részecskegyorsítók.
- 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...

Ezeket érdemes végiggondolni, kiszámolni – meglepő számok fognak kijönni!
(szeretnél beszélni róla? - daniel.barna@cern.ch)

- Hogyan tudjuk a részecskéket a gyűrűkből ki, illetve a gyűrűkbe belőni?
- Nem taszítják egymást a nyaláb azonos töltésű részecskéi? Hogyan maradnak mégis együtt nyalábként?
- 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?
- Mi történik, ha egy mágnes “elszáll” és nem tudja körpályán tartani ezt a nyalábot?
- Hogyan tudunk egyáltalán megszabadulni ettől a borzalmas energiát tároló nyalábtól?
- 1 eltérítő mágnesben tárolt mágneses energia 7 MJ. Mekkora sebességre lehetne felgyorsítani ezzel az energiával egy 1 tonnás járművet?
- Mi történik, ha egy szupravezető mágnes “elszáll” (quench) és egy kis ponton normál vezetővé válik?
- A gyorsításhoz a részecskéknek csomagokban kell érkezniük. Hogyan maradnak együtt órákon keresztül, “csomagokban”, jóllehet a sebességük mindig kicsit eltérő?